

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ana Ripa

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE
RAZLIČITIH IZVEDBI UMETAKA NOSIVE
KONSTRUKCIJE FORMULE STUDENT**

Mentori:

Prof. dr. sc. Janoš Kodvanj, dipl. ing.
Dr. sc. Martin Surjak, dipl. ing.

Student:

Ana Ripa

Zagreb, 2019.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svojim mentorima prof. dr. sc. Janošu Kodvanju i dr. sc. Martinu Surjaku za svu pomoć, strpljenje i savjete pružene tijekom izrade ovog završnog rada. Zahvaljujem tehničkom suradniku Gordanu Plačku za pomoć pri izradi uzoraka i svim kolegama koji su mi na bilo koji način pomogli u provedbi eksperimenata.

Zahvaljujem se svojoj obitelji na ukazanom razumijevanju i pruženoj podršci tijekom studija.

Naposlijetku, zahvaljujem se kolegama iz FSB Racing Team-a za pomoć pri izradi ispitnih uzoraka i na svim korisnim savjetima.

Ana Ripa



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, broдостrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ana Ripa** Mat. Br.: 0035200645

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Eksperimentalno ispitivanje različitih izvedbi umetaka nosive konstrukcije Formule Student**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Experimental investigation of various supporting structure inserts of the Formula Student car**

Opis zadatka:

Šasija je glavni strukturni potporanj automobila koji preuzima sva opterećenja kojima je izložen automobil. Može biti izvedena kao cijevna, ljuskasta ili hibridna konstrukcija. Ljuskasta monocoque šasija bolida Formule Student je izrađena od kompozitnih materijala u obliku sendvič strukture. Jedan od velikih izazova prilikom konstruiranja je način preuzimanja opterećenja na monocoque šasiji. Umetci u monocoque šasiji su neodvojivi dijelovi konstrukcije te predstavljaju vezu između ispuna sendviča i ostalih dijelova koji se spajaju na šasiju. Umetci raspodjeljuju koncentrirane sile na veću površinu kompozita i na taj način smanjuju utjecaj koncentracije naprezanja. U radu je potrebno eksperimentalno ispitati vezu između umetka i reprezentativnog uzorka monocoque šasije pri savijanju te vlačnom i tlačnom opterećenju. Pomake tijekom provedbe eksperimenta mjeriti bezkontaktno optičkim mjernim sustavom Aramis.

Tijekom rada potrebno je:

1. Upoznati se s radom statičke kralice i pripradajućeg upravljačkog programa.
2. Upoznati se s radom optičkog mjernog sustava za bezkontaktno mjerenje pomaka.
3. Za karakteristični umetak odrediti kritičnu silu pri savijanju, vlačnom i tlačnom opterećenju koja dovodi do narušavanja integriteta ispitnog uzorka.
4. Odrediti polje pomaka i deformacija na mjestu spoja umetka i kompozitne strukture.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualnu dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
29. studenog 2018.

Rok predaje rada:
1. rok: 22. veljače 2019.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2019.
3. rok: 20. rujna 2019.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 25.2. - 1.3. 2019.
2. rok (izvanredni): 2.7. 2019.
3. rok: 23.9. - 27.9. 2019.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Janoš Kodvanj
Dr. sc. Martin Surjak

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Bačen

SADRŽAJ

1. UVOD.....	10
1.1. Formula Student.....	10
1.2. FSB Racing Team.....	11
1.3. Nosiva konstrukcija – šasija	13
1.3.1. Šasija ljevičastog oblika (twin tube)	13
1.3.2. Višecijevna šasija	14
1.3.3. Prostorna rešetka	15
1.3.4. Monocoque šasija	17
2. KOMPOZITNI MATERIJALI.....	19
2.1. Sendvič konstrukcije.....	19
2.2. Ugljičnim vlaknima ojačani polimerni kompozita	20
2.3. Prepreg	22
2.4. Jezgra	23
3. PROIZVODNI POSTUPAK – AUTOKLAV	25
4. UMETCI.....	27
4.1. Podjela umetaka.....	27
4.2. Konstrukcijske izvedbe umetaka	28
4.3. Osnovna opterećenja na umetcima	29
4.4. Smjernice za konstruiranje veza s umetcima	30
5. IZRADA SENDVIČ PANELA S UMETCIMA	32
5.1. Odabir materijala	32
5.2. Dimenzije uzoraka.....	32
5.3. Pregled umetaka uzoraka	33
5.4. Pregled podloški	34
5.5. Oznake uzoraka.....	35
5.6. Postupak izrade	35
5.7. Priprema uzoraka za testiranje	43
6. EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE	47
6.1. Optički mjerni sustav Aramis	47
6.1.1. Postupak snimanja	48
6.1.2. Nanošenje stohastičkog rastera	49
6.2. Testiranje uzoraka opterećenjem na savijanje	53

6.3. Testiranje uzoraka tlačnim opterećenjem	54
6.4. Testiranje uzoraka vlačnim opterećenjem	55
7. REZULTATI	56
7.1. Rezultati ispitivanja uzoraka opterećeni na savijanje	56
7.1.1. Pomaci i deformacije uzoraka testiranih opterećenjem na savijanje	57
7.1.2. Zaključci testiranja uzoraka opterećenih na savijanje	61
7.2. Rezultati ispitivanja uzoraka opterećeni na tlak	62
7.2.1. Pomaci i deformacije uzoraka testiranih tlačnim opterećenjem	63
7.2.2. Zaključci testiranja tlačno opterećenih uzoraka.....	64
7.3. Rezultati ispitivanja uzoraka opterećeni na vlak	65
7.3.1. Pomaci i deformacije uzoraka testiranih tlačnim opterećenjem	66
7.3.2. Zaključci testiranja vlačno opterećenih uzoraka	69
8. ZAKLJUČAK.....	70
LITERATURA.....	70
PRILOZI.....	74

POPIS SLIKA

Slika 1. Natjecanja Formule Student u svijetu [1]	10
Slika 2. Raspodjela bodova na <i>Formula Student</i> natjecanjima [2]	11
Slika 3. Funkcionalni prikaz šasije [3]	13
Slika 4. <i>Twin tube</i> šasija <i>Jaguar-Lister-a</i> iz 1958. godine [4]	14
Slika 5. <i>Spaceframe</i> šasija <i>Lotus Nineteen</i> iz 1952. godine [4]	14
Slika 6. Prostorna rešetka bolida StrixR [5]	15
Slika 7. Monocoque šasija McLaren MP4/1 [6]	17
Slika 8. Usporedba <i>monocoque</i> i cijevne šasije [12].....	18
Slika 9. Sendvič konstrukcija [8]	19
Slika 10. Tkanja vlakana koja se pretežno koriste u izradi kompozitnih dijelova	21
Slika 11. Prepreg [11].....	22
Slika 12. Ispune kompozitnih sendviča: a) aluminijsko saće, b) aramidno saće, c) Rohacell pjena [12].....	23
Slika 13. Mehanička svojstva različitih materijala saća u odnosu na njihovu gustoću [9]	23
Slika 14. Definicija veličine ćelije [12].....	24
Slika 15. Presjek autoklava [15].....	25
Slika 16. Tipični ciklus umreživanja u autoklavu za ugljik/epoksid kompozit [16].....	26
Slika 17. Shematski prikaz umetaka: a) potpuno prolazni umetak, b) umetak koji je potpuno uronjen u ljepilo i c) umetak koji je djelomično uronjen u ljepilo [17]	27
Slika 18. Konstrukcijske izvedbe umetaka: a) blok, b) kutijasti profil, c) cijev sa suženjem i d) cijev s prirubnicama [18]	28
Slika 19. Načini opterećenja umetaka: a) vlak, b) smik, c) savijanje,	29
Slika 20. Dimenzioniranje podloški: a) ispravan postupak, b) i c) neispravan postupak [17].	30
Slika 21. Prijenos opterećenja momentom na umetak: a) ispravan postupak, b) neispravan postupak [17].....	30
Slika 22. Prijenos momenata preko umetaka koji su djelomično uronjeni u ljepilo [17]	31
Slika 23. Prijenos momenta preko potpuno prolaznog umetka [17]	31
Slika 24. Pucanje ljuske sendviča [17].....	31
Slika 25. Dimenzije ispitnog uzorka izrezanog iz sendvič konstrukcije.....	32
Slika 26. Presjek umetka tipa D	34
Slika 27. Dimenzije podloške.....	34
Slika 28. Oznake uzoraka.....	35
Slika 29. Priprema radne površine	36
Slika 30. Postavljeni prepreg prve kore	36
Slika 31. Postavljanje tkanine za odijeljivanje	37
Slika 32. Postavljanje odjeljivača prije prvog umrežavanja	37
Slika 33. Postavljanje <i>breather</i> tkanine.....	38
Slika 34. Vakuumiranje laminata	38
Slika 35. Mjerenje tlaka unutar vakuum vreće.....	39
Slika 36. Pozicionirani umetak unutar sendviča	39
Slika 37. Obradena i neobrađena površina umetka	40
Slika 38. Pozicionirani umetak tipa D.....	40
Slika 39. Postavljanje release filma prije drugog umrežavanja	41
Slika 40. Vakuumiranje uzoraka prije drugog umrežavanja	42
Slika 41. Lijepljenje podloški za uzorke	42
Slika 42. Uzorci s podloškama	43
Slika 43. Dimenzije čeličnog okvira	43
Slika 44. Okvir za opterećenje uzoraka na savijanje.....	44

Slika 45. Opterećivanje uzoraka na savijanje.....	44
Slika 46. Ispitivanje uzoraka na tlak	45
Slika 47. Ispitivanje uzoraka na vlak	45
Slika 48. Uzorci nakon nanošenja stohastičkog rastera	46
Slika 49. Optički sustav <i>Aramis</i> [19]	47
Slika 50. Stohastički raster na površini uzorka	49
Slika 51. Kalibracijski objekt	50
Slika 52. Ilustracija sustava <i>Aramis</i> s potrebnim parametrima za podešavanje [19]	51
Slika 53. Faseta veličine 15x15, s 2 preklapajuća piskela [19].....	51
Slika 54. Ovisnost mjerne nesigurnosti pomaka i deformacije o veličini fasete [20].....	52
Slika 55. Prikaz faseta od snimke 0-5 [19].....	53
Slika 56. Eksperimentalni postav kod ispitivanja uzoraka pri savijanju.....	54
Slika 57. Eksperimentalni postav za ispitivanje uzoraka pri tlačnom opterećenju	54
Slika 58. Eksperimentalni postav kod vlačnog ispitivanja uzoraka	55
Slika 59. Dijagram sila-pomak za uzorke A-S1, A-S2, B-S1, B-S2, C-S2, D-S2 pri savijanju	56
Slika 60. Polje pomaka za uzorak A-S1	57
Slika 61. Dijagram pomak-duljina presjeka za uzorak A-S1	57
Slika 62. Polje deformacija za uzorak A-S1	58
Slika 63. Polje pomaka za uzorak B-S1	58
Slika 64. Dijagram pomak-duljina presjeka za uzorak B-S1	58
Slika 65. Polje pomaka za uzorak B-S2	59
Slika 66. Dijagram pomak-duljina presjeka za uzorak B-S2	59
Slika 67. Polje pomaka za uzorak C-S2	59
Slika 68. Dijagram pomak-duljina presjeka za uzorak C-S2	60
Slika 69. Polje pomaka za uzorak D-S2.....	60
Slika 70. Dijagram pomak-duljina presjeka za uzorak D-S2	60
Slika 71. Oštećenje na uzorcima nakon opterećenja na savijanje: a) uzorak A-S1 i b) uzorak C-S2.....	61
Slika 72. Dijagram sila-pomak za uzorke A-T1, A-T2, B-T1, B-T2 pri tlačnom opterećenju	62
Slika 73. Polje pomaka za uzorak A-T1	63
Slika 74. Dijagram pomak-duljina presjeka za uzorak A-T1	63
Slika 75. Polje pomaka za uzorak B-T2	64
Slika 76. Dijagram pomak-duljina presjeka za uzorak B-T2	64
Slika 77. Dijagram sila-pomak za uzorke A-V1, A-V2, B-V1, B-V2, C-V2 i D-V2 pri vlačnom opterećenju	65
Slika 78. Polje pomaka za uzorak B-V1	66
Slika 79. Dijagram pomak-duljina presjeka za uzorak B-V1.....	66
Slika 80. Polje pomaka za uzorak B-V2	67
Slika 81. Dijagram pomak-duljina presjeka za uzorak B-V2.....	67
Slika 82. Polje pomaka za uzorak C-V2	67
Slika 83. Dijagram pomak-duljina presjeka za uzorak C-V2.....	68
Slika 84. Polje pomaka za uzorak D-V2	68
Slika 85. Dijagram pomak-duljina presjeka za uzorak D-V2	68

POPIS TABLICA

Tablica 1. Bolidi FSB Racing Team-a	12
Tablica 2. Razvoj nosive konstrukcije – šasijske FSB Racing Team-a [5]	16
Tablica 3. Promjena svojstava povećanjem poprečnog presjeka sendvič konstrukcije [9]	20
Tablica 4. Usporedba umetaka	28
Tablica 5. Ispitani umetci	33
Tablica 6. Dimenzije podloški	34
Tablica 7. Parametri kalibracijskog objekta	50
Tablica 8. Iznos maksimalne sile i momenta savijanja	56
Tablica 9. Iznos maksimalne sile za tlačno opterećene uzorke	62
Tablica 10. Iznos maksimalne sile kod vlačnog opterećenja uzoraka	65

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
d_1	mm	Unutarnji promjer podloške
d_2	mm	Vanjski promjer podloške
s	mm	Debljina podloške
F_{\max}	N	Maksimalna sila
M_{\max}	Nm	Maksimalni moment savijanja

POPIS KRATICA

SAE	Zajednica automobilskih inženjera (engl. <i>Society of automotive engineering</i>)
HSA-SF	Hrvatska studentska asocijacija strojarstvih fakulteta
FSB	Fakultet strojarstva i brodogradnje

SAŽETAK

U ovom radu je eksperimentalno ispitana veza između umetka i reprezentativnog uzorka monocoque šasije bolid Formula Student. Ukratko je opisan projekt FSB Racing Team-a čiji je jedan od ciljeva konstrukcija i izrada monocoque šasije za novi bolid. Prikazane su konstrukcijske izvedbe umetaka i smjernice za konstruiranje veze između umetka i sendvič konstrukcije. Opisani su kompozitni materijali koji se koriste u izradi takve šasije te umetci koji predstavljaju vezu između ispuna sendviča i ostalih dijelova koji se spajaju na šasiju i služe za prijenos lokalnih opterećenja na nosivu konstrukciju. Statička ispitivanja s ciljem određivanja opterećenja koji dovode do narušavanja integriteta kompozitne sendvič konstrukcije provedena su na uzorcima s jezgrom od aluminijskog saća i s umetcima od aluminijske legure i brezove šperploče pri savijanju, vlačnom i tlačnom opterećenju. Polje pomaka i deformacija na mjestu spoja umetka i kompozitne sendvič strukture određeno je metodom korelacije digitalne slike pomoću optičkog mjernog sustava Aramis.

Ključne riječi: *monocoque* šasija, umetak, kompozitni materijali, pomak, Aramis

SUMMARY

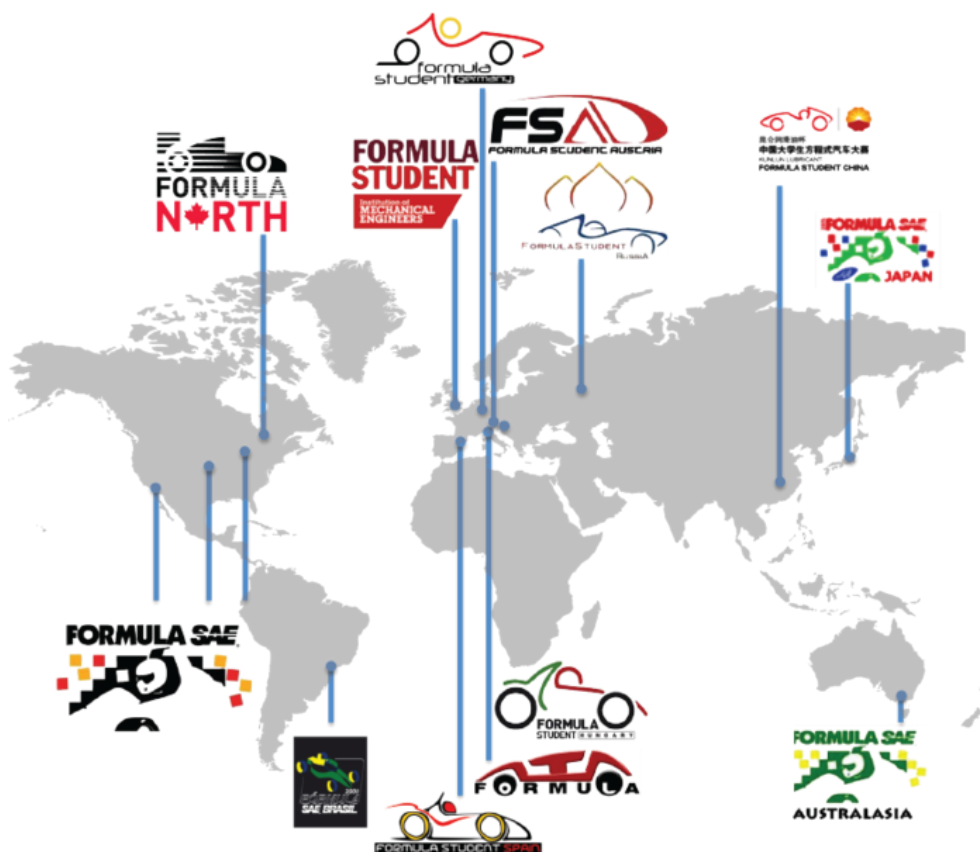
In this thesis, the connection between the insert and representative model of monocoque chassis of the Formula Student car has been experimentally examined. It includes a brief description of the FSB Racing Team project which had construction and manufacturing of a monocoque chassis for the new car as one of its goals. The construction of inserts and the guidelines for the construction of a connection between insert and sandwich construction have been shown. Composite materials used in making such a chassis and inserts that represent the connection between the filling of sandwiches and other parts that are connected to the chassis and serve to transfer local loads to the supporting structure have been described. Static tests with a goal to determinate bending, tensile and compressive loads that lead to distortion of a composite sandwich construction were carried out on samples with aluminium honeycomb core and with aluminium alloy and beech plywood inserts. The displacement and strain field on the area of connection between the insert and composite sandwich structure was determined by a digital image correlation method using the Aramis optical measurement system.

Key words: *monocoque* chassis, insert, composite materials, displacement, Aramis

1. UVOD

1.1. Formula Student

Formula Student globalna je sportska i inženjerska natjecateljska kategorija namijenjena studentima pod regulacijom društva SAE International (*Society of automotive engineering*). Kategorija obuhvaća devet službeno akreditiranih godišnjih natjecanja u dizajniranju, simuliranju i proizvodnji bolida jednosjeda čije su tehničke specifikacije usko definirane pravilnikom krovnog društva. Osim akreditiranih natjecanje od društva SAE International postoje i druga natjecanja Formule Student u preko 20 zemalja (Slika 1). Za razliku od Formule 1, gdje je cilj pobijediti u utrci i gdje je fokus stavljen na vozače, glavni aspekt u Formuli Student su tehnička rješenja bolida.

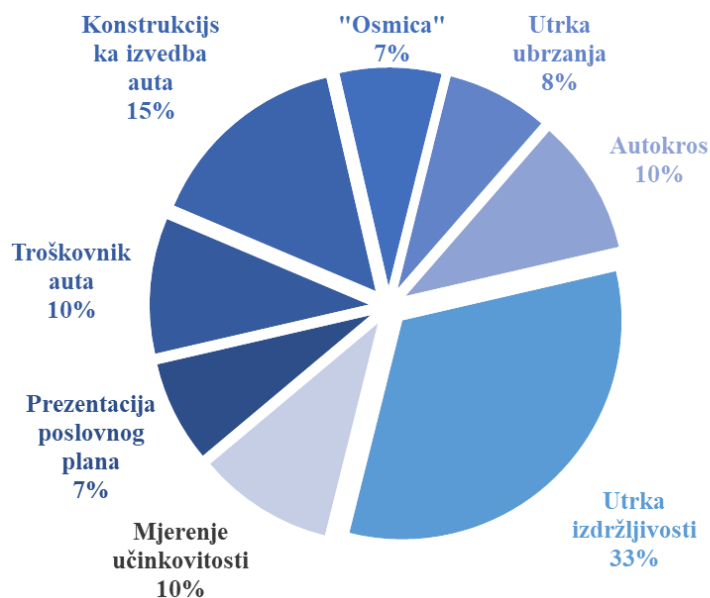


Slika 1. Natjecanja Formule Student u svijetu [1]

Svako natjecanje se sastoji od statičkih i dinamičkih elemenata. Statički dio se sastoji od pregleda konstrukcijskih rješenja podsustava bolida (engl. *Design report*), troškovnika cijelog bolida (engl. *Cost report*), te prezentacije poslovnog plana (engl. *Business plan presentation*).

U dinamičkom testiranju ocjenjuje se vožnja slaloma (engl. *Skidpad*), vrijeme ubrzanja bolida na 75 m staze (engl. *Acceleration*), vožnja brzog kruga (engl. *Autocross*), vožnja izdržljivosti bolida od 22 km (engl. *Endurance*) te potrošnja goriva na trci izdržljivosti (engl. *Fuel efficiency*). Raspodjela bodova ocjenjivanja na natjecanjima *Formula Student* prikazana je na slici 2.

Kako bi tim uopće mogao pristupiti dinamičkim testovima, bolid mora proći tehnički pregled koji se sastoji od tehničke inspekcije, ispitivanja kočenja (engl. *Brake test*), ispitivanja naginjanja bolida (engl. *Tilt test*) te ispitivanja buke bolida (engl. *Noise test*) koje obavljaju stručnjaci iznimno kompetentnog sudačkog žirija koji dolaze iz vrha automobilske industrije i motosporta.









Slika 2. Raspodjela bodova na *Formula Student* natjecanjima [2]

1.2. FSB Racing Team

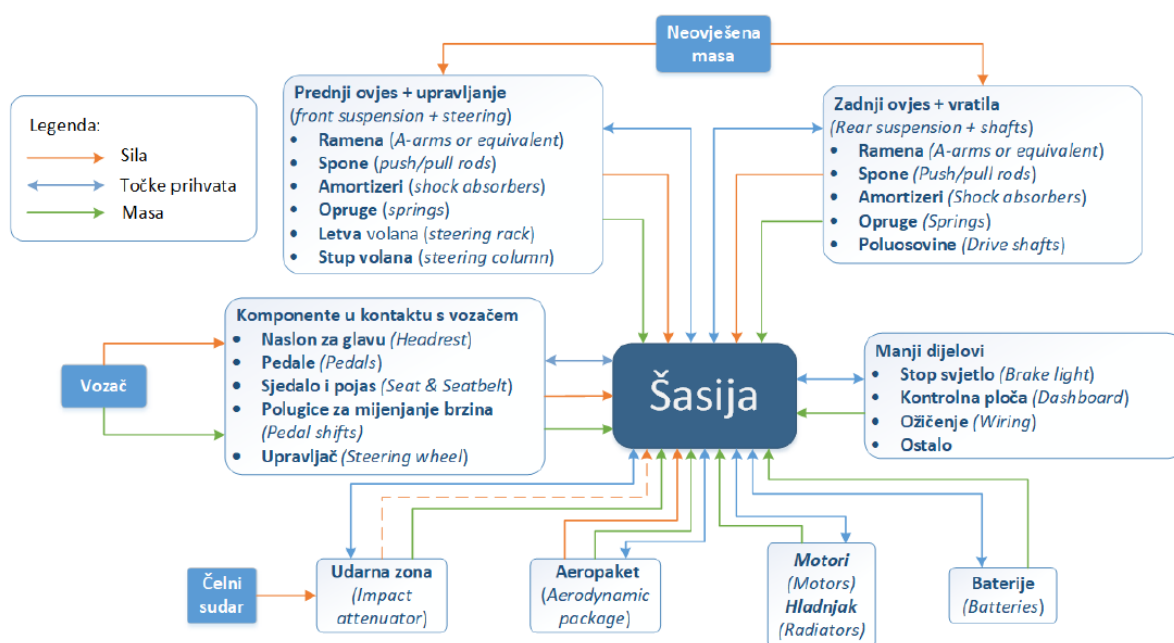
FSB Racing Team je pokrenut pod pokroviteljstvom Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu i Hrvatske studentske asocijacije strojarskih fakulteta (HSA-SF) te mentora prof. dr. sc. Zorana Lulića i izv. prof. dr. sc. Darka Kozarca. Tim trenutno broji 50-ak članova s različitih sastavnica Sveučilišta u Zagrebu kao što su Fakultet strojarstva i brodogradnje, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Ekonomski fakultet, Grafički fakultet, Studij dizajna i drugih fakulteta. U dosadašnjih 13 godina postojanja, tim aktivno sudjeluje na natjecanjima Formule Student te je dizajnirao, konstruirao i izradio 5 generacija bolida (Tablica 1).

Tablica 1. Bolidi FSB Racing Team-a

Godina	Kodni naziv, puni naziv vozila	Natjecanje	Plasman
2006.	FSB-RT01 <i>Kuna</i> 	Silverstone, Velika Britanija	35. od 72 tima
2007.	FSB-RT02 <i>Ris</i> 	Silverstone, Velika Britanija	48. od 84 tima
2012.	FSB-RT03 <i>Likos</i> 	Silverstone, Velika Britanija	24. od 103 tima
2013.	FSB-RT04 <i>Arctos</i> 	Hockenheim, Njemačka	56. od 75 timova
2015.	FSB-RT04R <i>ArctosR</i> 	Silverstone, Velika Britanija	10. od 97 timova
2017.	FSB-RT05 <i>Strix</i> 	Győr, Mađarska	13. od 41 tima
2018.	FSB-RT05R <i>StrixR</i> 	Silverstone, Velika Britanija	12. od 81 tima

1.3. Šasija vozila

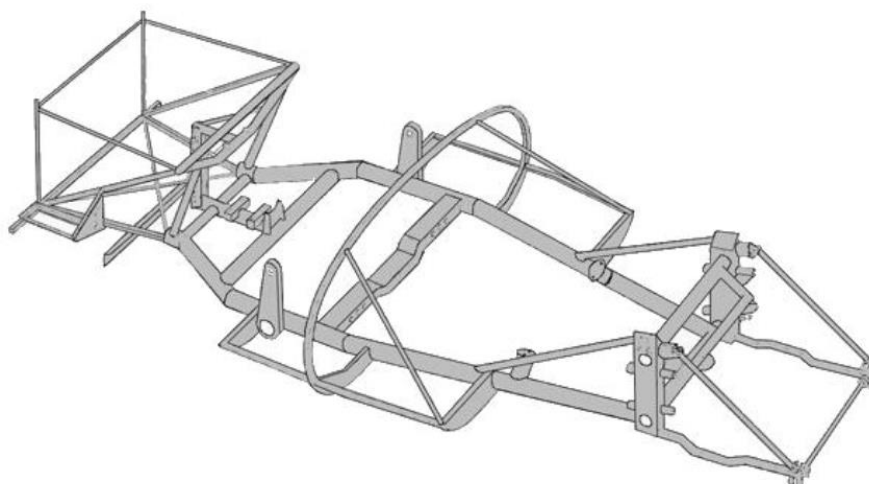
Šasija je glavni strukturni potporanj automobila koji preuzima sva opterećenja kojima je automobil izložen. Mora biti projektirana tako da svojom konstrukcijom posjeduje krutost da bi se zadržala dinamička svojstva automobila i dovoljnu čvrstoću da se zadovolje sigurnosni standardi. Postoji mnogo načina na koji se to može ostvariti, a optimalan izbor ovisi o primjeni automobila, cijeni, dostupnosti materijala i tehnologiji izrade. Funkcionalni prikaz šasije dan je na slici 3. U nastavku su opisane razne varijante konstrukcije šasije.



Slika 3. Funkcionalni prikaz šasije [3]

1.3.1. Šasija ljestvičastog oblika

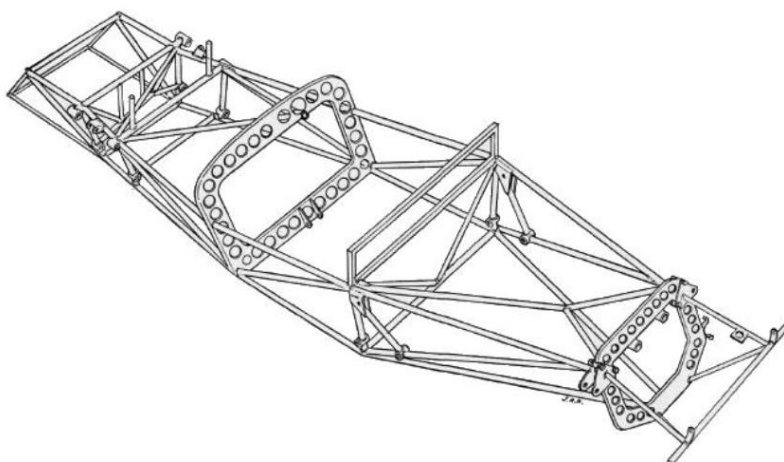
Šasija ljestvičastog oblika (engl. *twin tube*) sastoji se od dvije potporne cijevi koje se protežu u uzdužnom smjeru automobila. Takva konstrukcija je vrlo jednostavna po pitanju tehnologije izrade i troškovi proizvodnje su niski. Njena torzijska krutost ne ovisi puno o rasporedu cijevi, već se ona može povećati koristeći cijevi veće površine poprečnog presjeka. Prema tome, njen osnovni nedostatak u primjeni za trkaća vozila je niska torzijska krutost te velika masa u usporedbi s drugim izvedbama šasije. Na slici 4 prikazana je *twin tube* šasija Jaguar-Lister-a iz 1958. godine.



Slika 4. Twin tube šasija Jaguar-Lister-a iz 1958. godine [4]

1.3.2. Višecijevna šasija

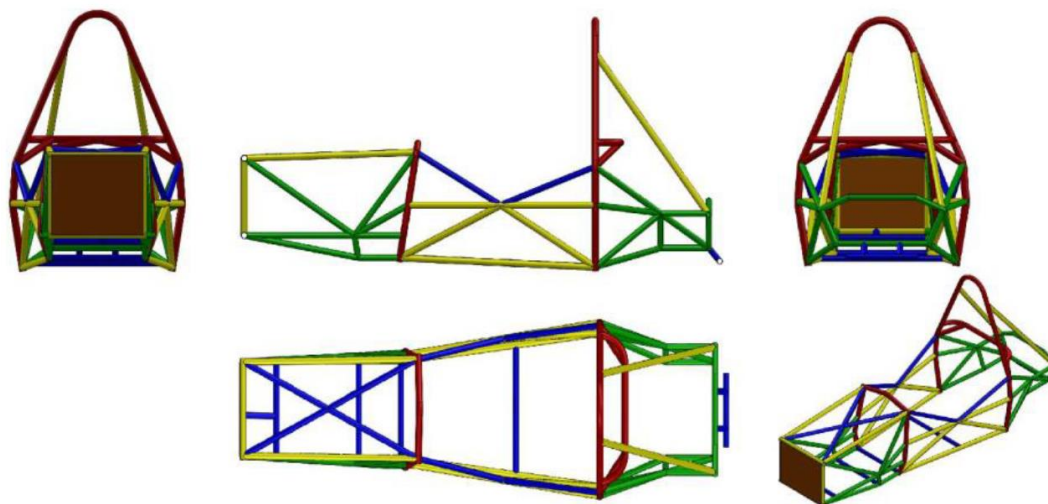
Višecijevna šasija je nosiva konstrukcija s više od dvije potporne cijevi. U praksi, pojam se odnosi na tip šasije koja sadrži četiri glavne potporne cijevi, no još uvijek se ne može klasificirati kao prostornu rešetku. Takva šasija se pokazala kao dobar kompromis između šasije ljestvičastog oblika i prostorne rešetke kada su u pitanju torzijska krutost i troškovi proizvodnje. U usporedbi s prostornom rešetkom, višecijevna šasija će uz zadovoljavajuću krutosti imati veću masu te se stoga ovakva konstrukcija šasije ne primjenjuje u izradi trkaćih automobila. Primjer višecijevne šasije prikazan je na slici 5.



Slika 5. Spaceframe šasija Lotus Nineteen iz 1952. godine [4]

1.3.3. Prostorna rešetka

Generalni princip prostorne rešetke jest preuzimanje vlačnih ili tlačnih opterećenja pomoću cijevi. To se postiže zavarivanjem cijevi šasijske (engl. *frame members*) u čvorovima. U idealnom slučaju, čvorovi apsorbiraju značajni iznos opterećenja pomoću potpornih cijevi u svim smjerovima opterećenja. Budući da su cijevi opterećene samo na vlak ili tlak, moguće je izbjeći savijanje cijevi, koje je glavni razlog gubitka torzijske krutosti. Na slici 6 prikazana je prostorna rešetka posljednjeg FSB Racing Team bolida – StrixR.

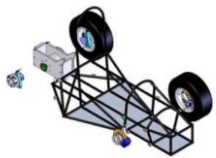




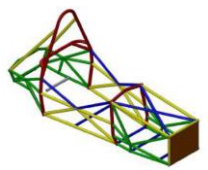
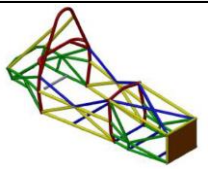


Slika 6. Prostorna rešetka bolida StrixR [5]

Sve dosadašnje šasijske bolida FSB Racing Team-a su izvedene kao prostorne čelične rešetke. Kao što je prikazano u tablici 2, prilikom razvoja svakog pojedinog bolida, masa šasijske se nije znatno mijenjala, ali se krutost povećala zahvaljujući povoljnijem rasporedu cijevi prostorne konstrukcije i odabiru dimenzija cijevi.

S ciljem da se još više smanji masa šasijske i istovremeno zadrži ili poveća torzijska krutost, za sljedeći bolid je odlučeno konstruirati monocoque šasiju.

Tablica 2. Razvoj nosive konstrukcije – šasijske FSB Racing Team-a [5]

Generacija bolida, kodni naziv, puni naziv	CAD model nosive konstrukcije	Masa nosive konstrukcije, kg	Torzijska krutost nosive konstrukcije, Nm/°
2006. FSB-RT01 Kuna		45,5	1080
2007. FSB-RT02 Ris		37,4	1550
2012. FSB-RT03 Likos		35,8	1420
2013. FSB-RT04 Arctos		32,6	1570
2015. FSB-RT04R ArctosR		30,5	1630
2017. FSB-RT05 Strix		29,5	1782
2018. FSB-RT05R StrixR		29,5	1782

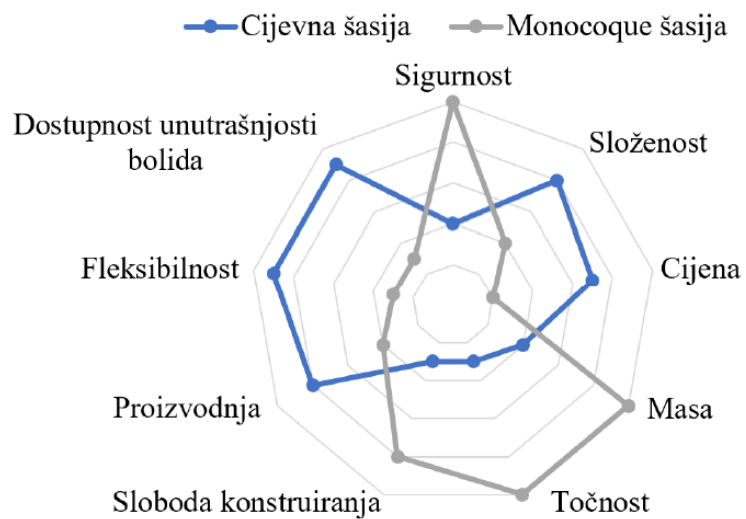
1.3.4. Monocoque šasija

Riječ „monocoque“ sastoji se od: „mono“ – latinski „jednostruk“ te „coque“ – francuski „školjka“. Monocoque šasija vuče korijene u 1920-te, kada se kao konstrukcijsko rješenje za trup sve bržih i jačih zrakoplova ponudio aluminij, koji je u tom periodu imao značajno nisku cijenu i mogao se nabaviti u obliku limova dimenzija dovoljno velikih za izradu trupa zrakoplova, pa je bio logičan odabir za njihovu proizvodnju. Paralelno sa zrakoplovima, i automobilska industrija razvija takve konstrukcije, pa 1923. godine talijanski proizvođač *Lancia* implementira monocoque šasiju u svoj model *Lambda*. Međutim tek 1941. godine sve prednosti takve konstrukcije dolaze do izražaja, kada proizvođač automobila *Nash motors* predstavlja svoj model 600, s konstrukcijom veće krutosti i čvrstoće, a masom nižom i do 300 kg od sličnih vozila. Proizvođač *McLaren* je 1981. godine proizveo prvo vozilo Formule 1 s monocoque šasijom koja je prikazana na slici 7.



Slika 7. Monocoque šasija McLaren MP4/1 [6]

Glavni nedostatak monocoque šasije u usporedbi s čeličnom je cijena, proizvodnja te pristupačnost komponentama bolida. Prednost je sloboda pri konstruiranju te točnost takve šasije. Sloboda konstruiranja daje mogućnost da se šasija konstruira tako da za svaki prihvata ima oblik, čvrstoću i krutost prema želji. Točnost je presudna za prihvate ovjesa kako bi vozilo imalo definirana dinamička svojstva. Uz to, monocoque šasija ima znatno manju masu s istom torzijskom krutošću i čvrstoćom u usporedbi s čeličnom šasijom, što je i glavni razlog odabira monocoque konstrukcije za šasiju sljedećeg bolida FSB Racing Team-a. Kvalitativna usporedba monocoque i cijevne šasije prikazana je na slici 8.



Slika 8. Usporedba *monocoque* i cijevne šasije [12]

2. KOMPOZITNI MATERIJALI

Kompoziti predstavljaju materijale koji nastaju spajanjem dvaju ili više materijala različitih svojstava u cilju dobivanja materijala poboljšanih svojstava kakva ne posjeduje ni jedan materijal zasebno.

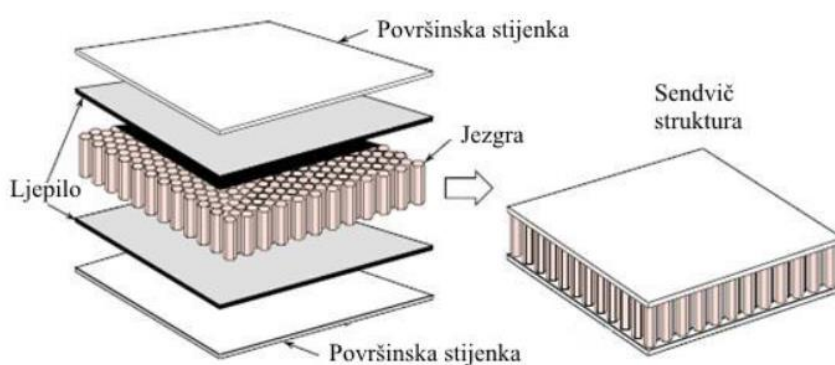
Kompozitni materijali dijele se na:

- kompozite s česticama,
- vlaknima ojačane kompozite,
- slojevite kompozite,
- strukturne kompozite (sendvič konstrukcije).

S obzirom da je cilj izrada šasijske bolida Formule Student od strukturnih kompozita, u radu je detaljnije objašnjena upravo ta vrsta kompozita.

2.1. Sendvič konstrukcije

Strukturni kompoziti (sendvič konstrukcije) sastoje se od dva kruta i čvrsta vanjska sloja koje povezuje materijal koji čini jezgru konstrukcije. Na slici 9 je shematski prikazana definicija sendvič konstrukcije.


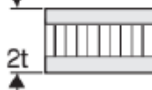
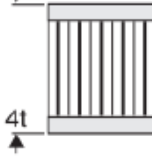


Slika 9. Sendvič konstrukcija [8]

Da bi se postigla željena mehanička svojstva zahtijevana konstrukcijom, osim rastezne čvrstoće, materijal mora posjedovati i visoku savojnu čvrstoću, odnosno krutost. Kako bi se

postigla što veća krutost nekog konstrukcijskog elementa ili sklopa, potrebno je povećati moment inercije odnosno površinu poprečnog presjeka. (Tablica 3).

Tablica 3. Promjena svojstava povećanjem poprečnog presjeka sendvič konstrukcije [9]

	Puni materijal	Debljina jezgre (t)	Debljina jezgre (3t)
			
Krutost	1,0	7,0	37,0
Savojna čvrstoća	1,0	3,5	9,2
Masa	1,0	1,03	1,06

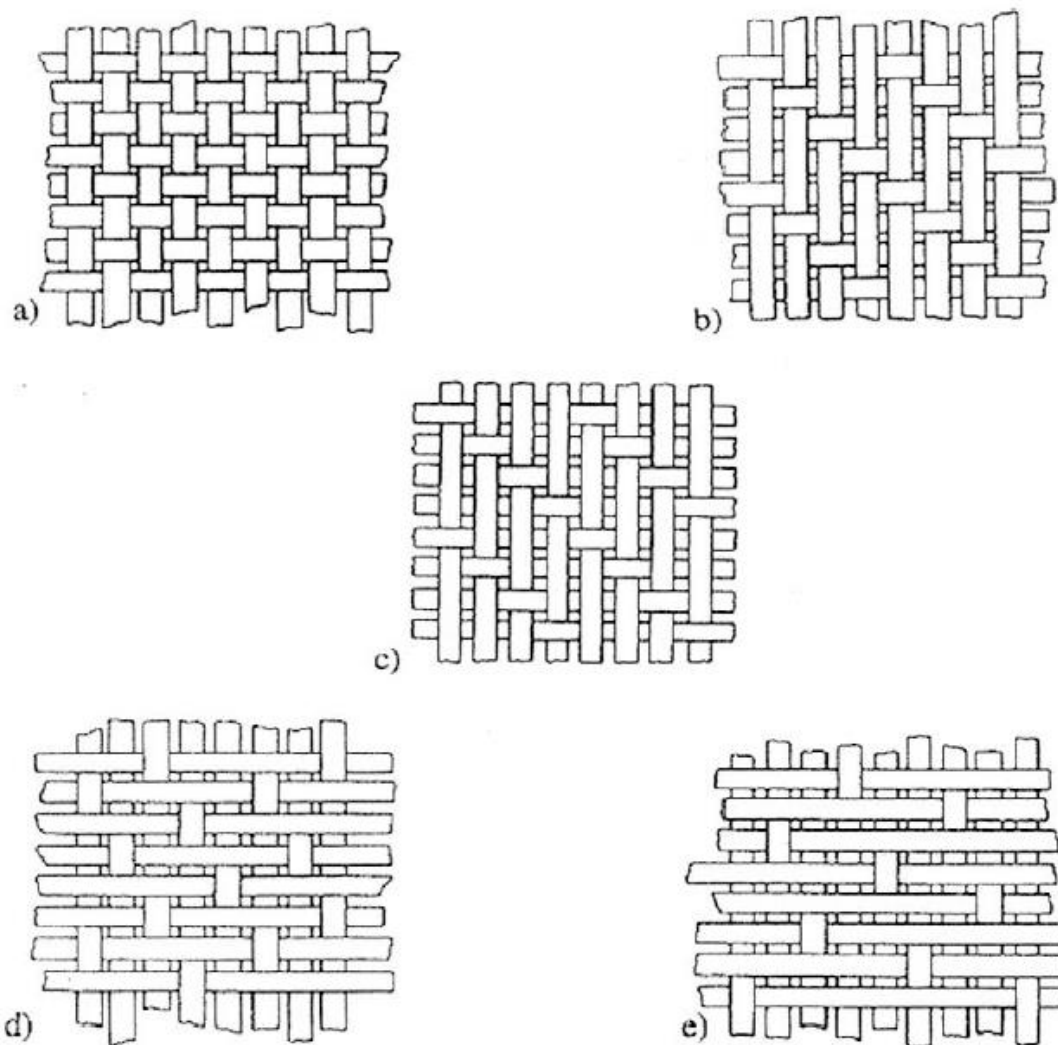
2.2. Ugljičnim vlaknima ojačani polimerni kompozit

Monocoque šasije današnjih trkaćih vozila se izrađuju kao sendvič konstrukcije. Uglavnom se ljuska sendviča izrađuje od ugljikovim vlaknima ojačanih polimera u kombinaciji s raznim vrstama jezgre.

Razlozi odabira ugljikovim vlaknima ojačanih polimera za izradu kore monocoque šasije su sljedeći:

1. ugljična vlakna imaju, od svih vlaknastih materijala za ojačanje, najviši specifični modul i najvišu specifičnu čvrstoću,
2. veliki iznos modula elastičnosti i čvrstoće zadržavaju i pri povišenim temperaturama,
3. kod sobne temperature, vlaga i niz otapala, kiselina i lužina ne razaraju ugljična vlakna,
4. razvijeni su postupci proizvodnje vlakana i kompozita koji su relativno jeftini.

Ugljikovim vlaknima ojačani polimeri dolaze u obliku različitih vrsta tkanja, od kojih su najčešće vrste prikazane na slici 10.



Slika 10. Tkanja vlakana koja se pretežno koriste u izradi kompozitnih dijelova: a) obično tkanje (eng. *plain weave*), b) 2x2 dijagonalno tkanje (eng. *2x2 twill*), c) 4x4 dijagonalno tkanje (eng. *4x4 twill*), d) 5-remensko satensko tkanje (eng. *5-harness satin*), e) 8-remensko satensko tkanje (eng. *8-harness satin*) [10]

Usmjerenje vlakana je izraženo u stupnjevima ($^{\circ}$), a izbor usmjerenja ovisi o smjeru opterećenja koje će vlakno prenositi. Zato se kora sendviča sastoji od slojeva tkanja polimera s različitim usmjerenjima vlakana kako bi se efikasno prenosila sva predviđena opterećenja u različitim zonama šasije bolida.

2.3. Prepreg

Prepreg je naziv kompozitnog sustava u kojem su ugljična vlakna već u samom proizvodnom postupku impregnirana s minimalnom potrebnom količinom smole (Slika 11).



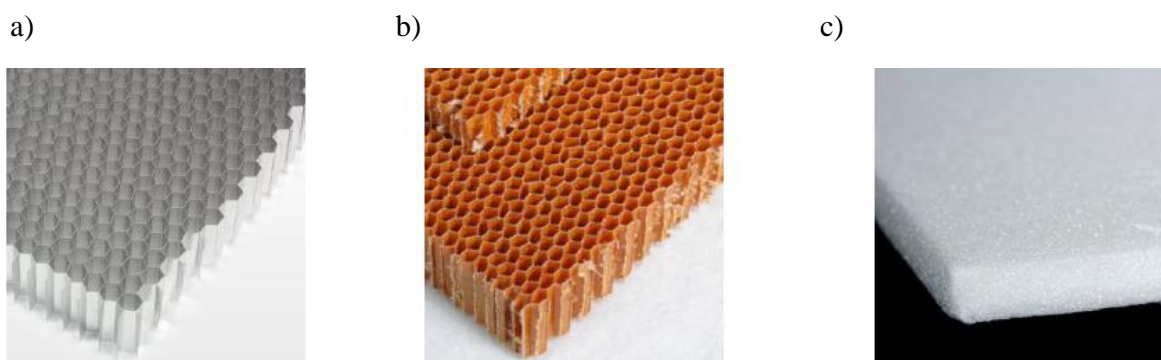
Slika 11. Prepreg [11]

Prednosti korištenja preprega u odnosu na tkanja ugljičnih vlakana bez prethodno impregnirane smole, tj. gdje je potrebno ručno nanijeti smolu:

1. prepreg ima maksimalnu čvrstoću i modul elastičnosti koja sustav ugljičnih vlakana može postići,
2. uniformnost i ponovljivost, korištenjem preprega izbjegnute se greške pri proizvodnji koje se mogu pojaviti kod ručnog laminiranja, kao što su mjesta s viškom ili nedostatkom smole,
3. lakše rukovanje, prepreg se može rezati i polagati u kalupe bez veće dorade,
4. vrijeme procesa stvrdnjavanja je kraće,
5. kvaliteta površine je bolja.

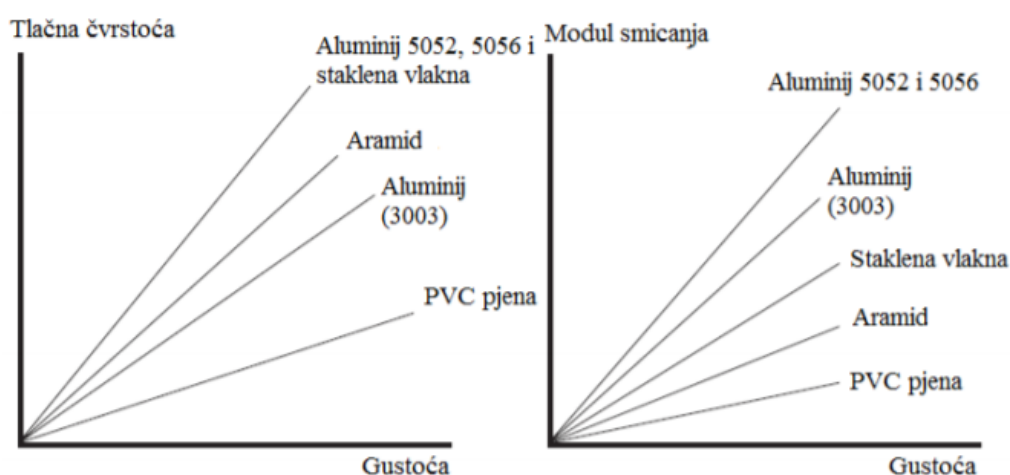
2.4. Jezgra

Svrha jezgre je prijenos opterećenja na vlakna, zaštita vlakna od oštećenja te osiguranje duktilnosti i čvrstoće kompozita. Što se tiče ispuna (jezgre) kod sendvič kompozita nosivih konstrukcija Formula Student bolida, najpopularnije je aluminijsko saće, aramidno saće (Kevlar, Nomex) i Rohacell pjena (Slika 12). Sva tri tipa ispune dolaze u različitim debljinama i s različitim gustoćama, ovisno o proizvođaču. Kod saćastih ispuna (aluminij i aramid), dimenzije saća su također različite.



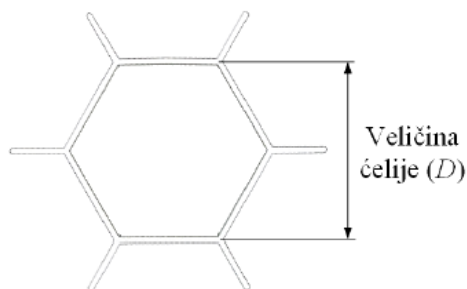
Slika 12. Ispune kompozitnih sendviča: a) aluminijsko saće, b) aramidno saće, c) Rohacell pjena [12]

Saćasta struktura ima relativno visoku tlačnu i smičnu čvrstoću uz nisku gustoću. Najveći utjecaj na to kakva će svojstva imati sendvič sa saćastom jezgrom ima materijal jezgre, oblik saća te spoj jezgre s korom. Aluminijske saće su po kriteriju omjera krutosti i specifične čvrstoće najbolja vrsta ispune (slika 13).



Slika 13. Mehanička svojstva različitih materijala saća u odnosu na njihovu gustoću [9]

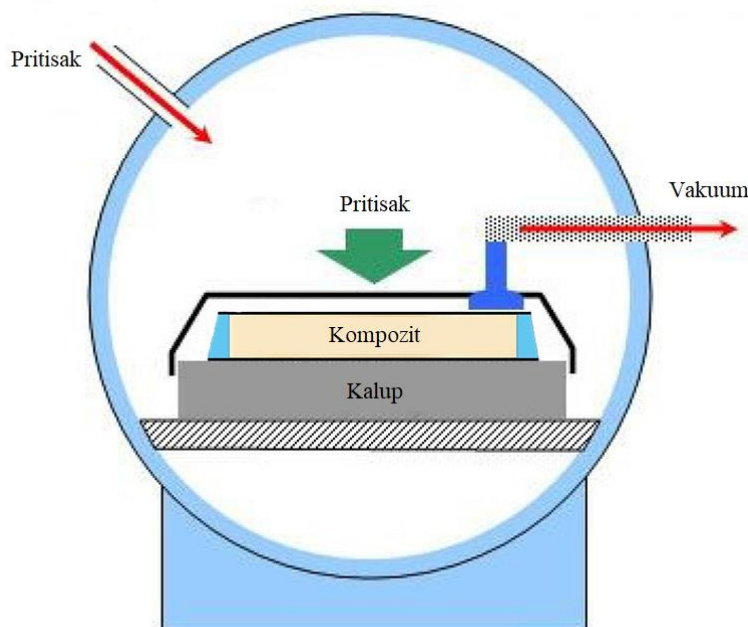
Iako je kod većih dimenzija saća masa niža, pa se time u konačnici dobiva lakši bolid, moguća je pojava izvijanja stjenke ćelije uslijed opterećenja na šasiji kod većih dimenzija ćelija. Dobiva se i manja kontaktna površina s korom od ugljičnih vlakana, pa postoji opasnost od delaminacije (odvajanja vlakana od saća). Zbog toga se FSB Racing Team odlučio za najmanju veličinu ćelije aluminijskog saća, kojoj je $D = 3,2$ mm (Slika 14), nauštrb veće mase.



Slika 14. Definicija veličine ćelije [12]

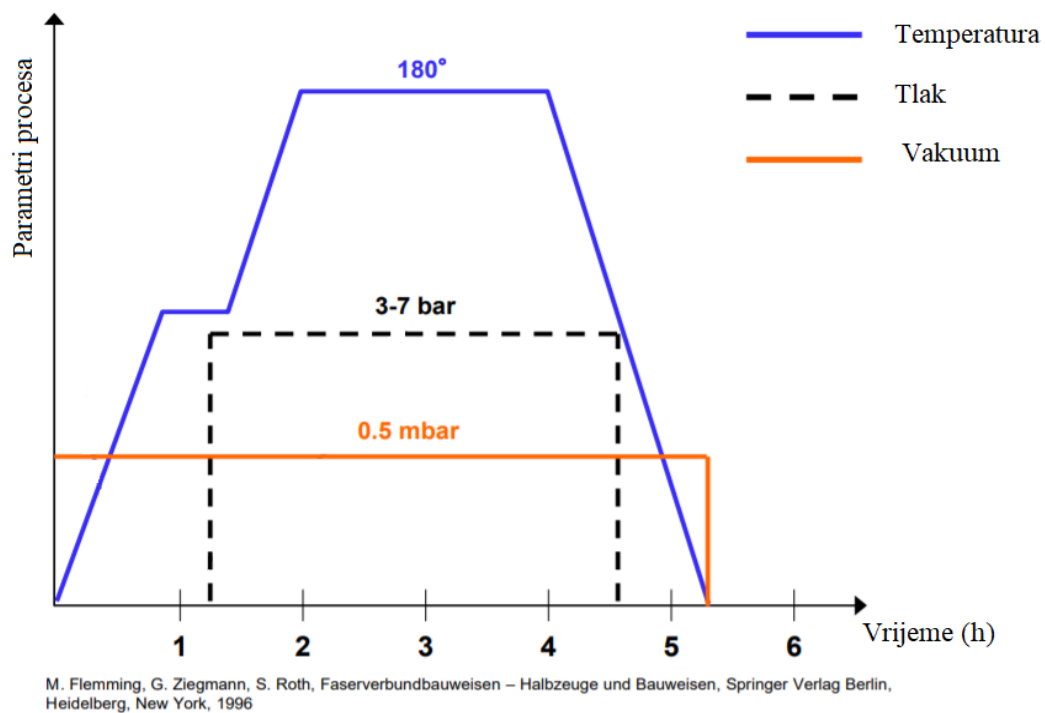
3. POSTUPAK PROIZVODNJE KOMPOZITNIH MATERIJALA

Mehanička svojstva gotovog proizvoda od kompozitnih materijala su usko vezana uz proizvodni postupak. Proizvod od kompozitnog materijala ne smije imati vidljivih oštećenja uzrokovanih proizvodnim postupkom, mora imati ujednačena mehanička svojstva te ponovljivost prilikom izrade više jednakih tvorevina. Kod proizvoda od kompozitnih materijala proizvodni postupak je definiran odabirom materijala proizvoda. Kako će se kod izrade šasije za izradu kore koristiti prepreg, za proizvodnju je potrebno koristiti autoklav (slika 15). Autoklav je peć projektirana tako da se uz regulaciju tlaka može regulirati i temperatura pri kojoj će se umreživati smola, što omogućuje projektiranje ciklusa umreživanja. Kontroliranim ciklusima dobivaju se proizvodi znatno boljih mehaničkih svojstava.



Slika 15. Presjek autoklava [15]

Laminat se u početku zagrijava brzinom od 2 do 4 °C/min do temperature od 110 do 125 °C pod potpunim podtlakom, kako bi smola u prepregu omekšala te kako bi se uklonili plinovi unutar postava. Podtlak i temperatura se održavaju približno jedan sat, nakon čega se unutar peći komprimira zrak na tlak od 3 do 7 bari. Potom se temperatura diže do 175 °C brzinom 2 – 4 °C/min, te se s tim parametrima nastavlja umreživanje. Nakon umrežavanja, hlađenje se vrši postupno kako bi se izbjegla zaostala naprezanja i mikro pukotine (Slika 16).



Slika 16. Tipični ciklus umreživanja u autoklavu za ugljik/epoksid kompozit [16]

4. UMETCI

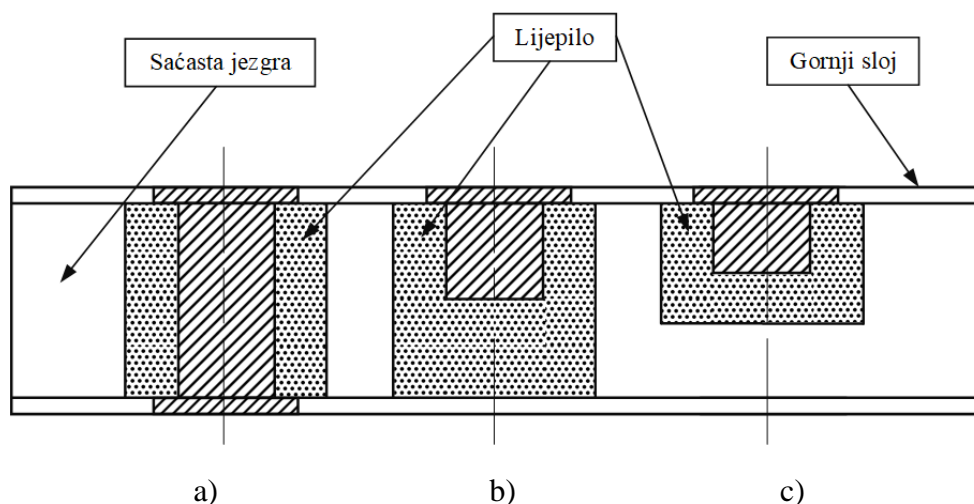
Jedan od glavnih izazova je pravilan način prijenosa lokalnih opterećenja na šasiju. To se izvodi pomoću umetaka. Umetak u šasiji je neodvojivi dio konstrukcije koji predstavlja vezu između ispuna sendviča i ostalih dijelova poput prihvata, okvira, profila, nosača, itd. [22].

Osnovna mu je zadaća prijenos opterećenja na veću površinu te samim time i smanjenje koncentracije naprezanja.

Umetak se može sastojati od odvojivog i fiksnog elementa. Dio koji je zamjenjiv je vijak ili drugi navojni element prihvaćen na navoj u umetku. Kada se jednom ugradi u šasiju, fiksni element se ne može zamijeniti niti se na njemu mogu raditi ikakve naknadne promjene. On je ljepilom spojen za saće i vlakna u šasiji.

4.1. Podjela umetaka

U osnovi, umetci se dijele na tri osnovna tipa: potpuno prolazni umetak (engl. *through the thickness*) – umetak koji prolazi kroz čitavu debljinu sendvič strukture, umetak koji je potpuno uronjen u ljepilo (engl. *fully potted*) – umetak koji ne prolazi kroz čitavu debljinu, ali njegovo ljepilo da, te umetak koji je djelomično uronjen u ljepilo (engl. *partially potted*) – umetak koji ne prolazi kroz čitavu debljinu kompozita, kao ni njegovo ljepilo. Svi navedeni tipovi prikazani su shematski na slici 17.



Slika 17. Shematski prikaz umetaka: a) potpuno prolazni umetak, b) umetak koji je potpuno uronjen u ljepilo i c) umetak koji je djelomično uronjen u ljepilo [17]

Usporedba mogućnosti prijenosa statičkih opterećenja i uštede na masi za navedene vrste umetaka dana je u tablici 4.

Tablica 4. Usporedba umetaka

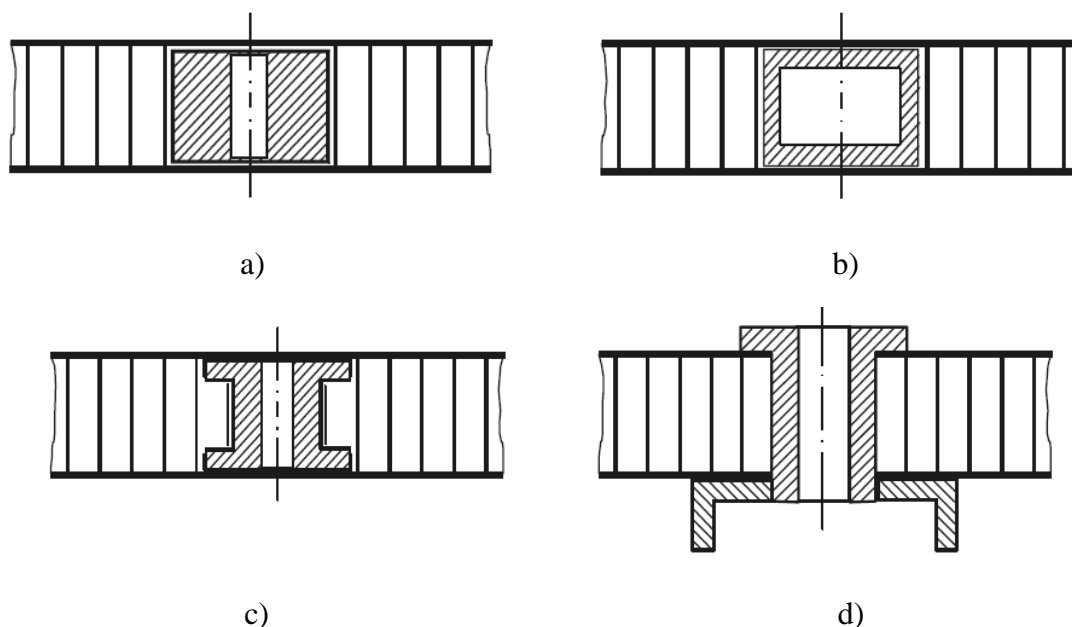
Vrsta umetaka	Ušteda mase	Prijenos statičkih opterećenja
Umetak koji je djelomično uronjen u ljepljivo (engl. <i>partially potted</i>)	●●●	●
Umetak koji je potpuno uronjen u ljepljivo (engl. <i>fully potted</i>)	●●	●●
Potpuno prolazni umetak (engl. <i>through the thickness</i>)	●	●●●

Legenda:

- – slabo,
- – umjereno,
- – vrlo dobro.

4.2. Konstrukcijske izvedbe umetaka

Na slici 18 prikazana su konstrukcijska rješenja potpuno prolaznih umetaka.



Slika 18. Konstrukcijske izvedbe umetaka: a) blok, b) kutijasti profil, c) cijev sa suženjem i d) cijev s prirubnicama [18]

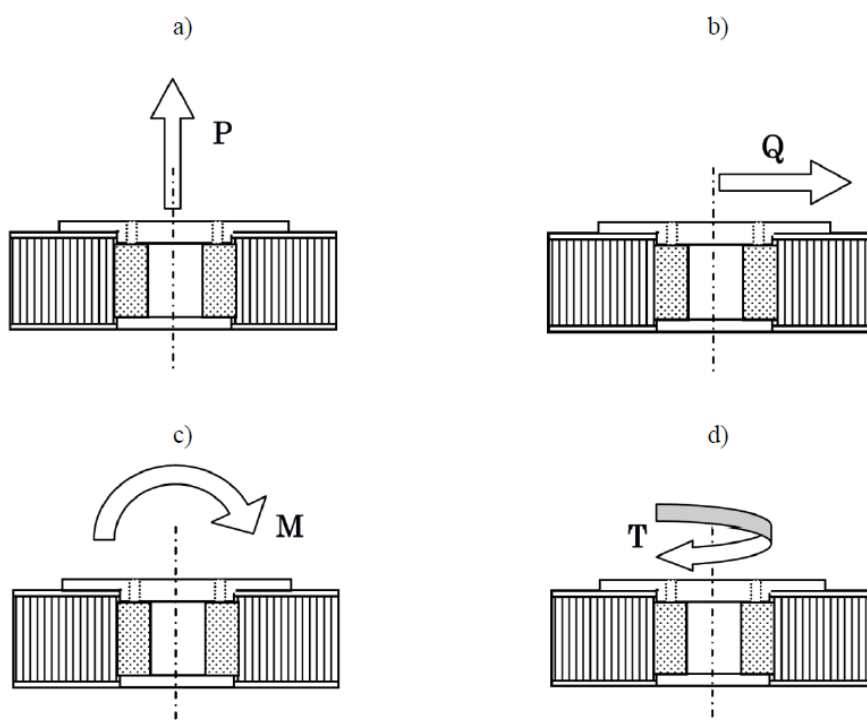
Pri odabiru konstrukcijske izvedbe u obzir treba uzeti sljedeće kriterije:

1. način ugradnje u šasiju,
2. čvrstoću prihvata,
3. masu,
4. rastavljivost prihvata,
5. troškove izrade.

U ovom radu umetci za eksperimentalno ispitivanje izvedeni su kao blokovi (Slika 18 a) radi niskih troškova izrade, jednostavne ugradnje i veće čvrstoće u usporedbi s drugim izvedbama prolaznih umetaka.

4.3. Opterećenja na umetcima

Na slici 19 prikazani su osnovni načini opterećenja umetaka. Iako su prikazani umetci s prirubnicama, opterećenja se također odnose i na umetke bez prirubnica.

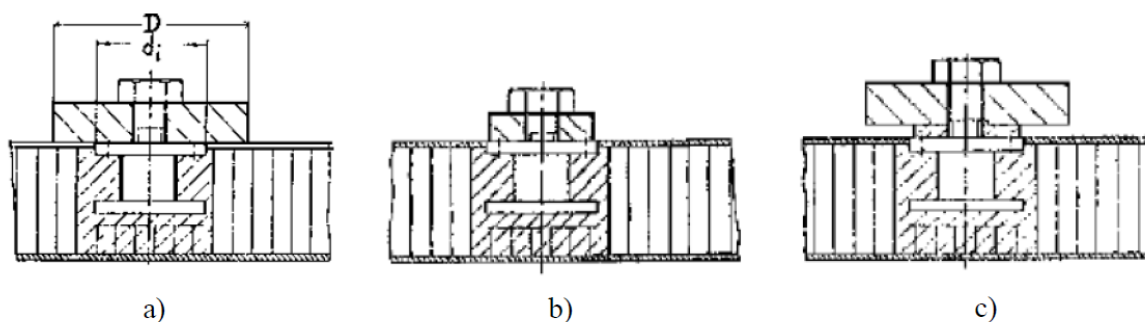


Slika 19. Načini opterećenja umetaka: a) vlak, b) smik, c) savijanje, d) uvijanje [17]

4.4. Smjernice za konstruiranje veza s umetcima

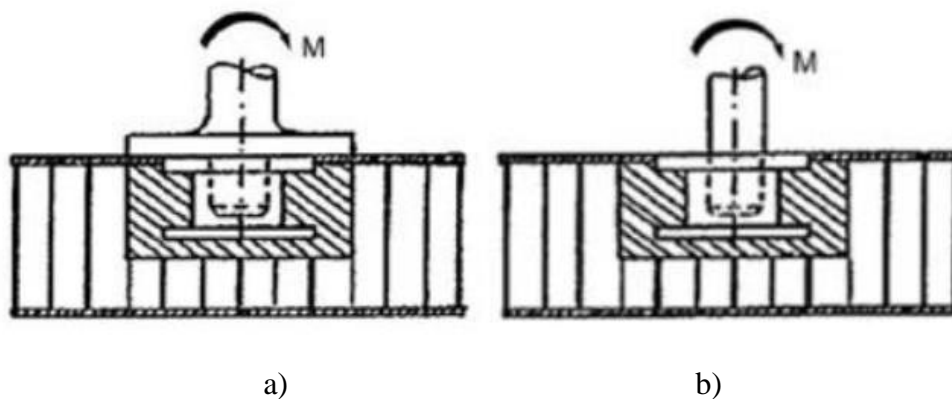
Smjernice za konstruiranje veza s umetcima, prema [17] glase:

- Tlačna opterećenja se prenose preko ljosaka sendviča u području ljepila. Prirubnica promjera D mora biti veća od najvećeg dosega ispune (Slika 20. a). Na slici 20. b) prikazano je neispravno dimenzioniranje umetaka jer je kontaktna površina manja od dodirne površine prirubnice. Slika 20. c) također predstavlja neispravan način dimenzioniranja jer je metalna pločica manja od promjera ljepila.



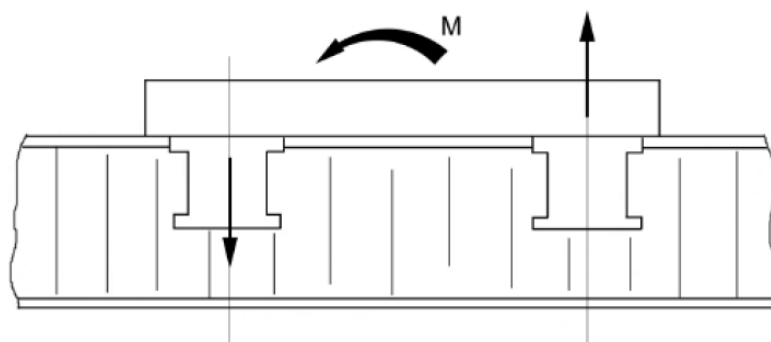
Slika 20. Dimenzioniranje podloški: a) ispravan postupak, b) i c) neispravan postupak [17]

- Prijenos momenta na umetak treba izbjegavati (Slika 21).



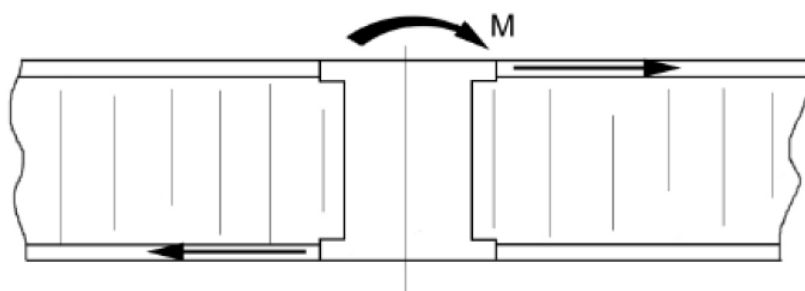
Slika 21. Prijenos opterećenja momentom na umetak: a) ispravan postupak, b) neispravan postupak [17]

- Ukoliko ih je nemoguće izbjeći, momenti se prenose preko parova umetaka koji su djelomično uronjeni u ljepilo kao što je prikazano na slici 22.



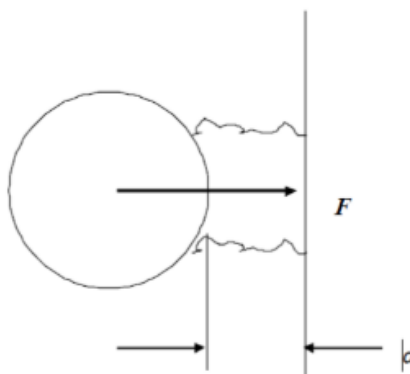
Slika 22. Prijenos momenata preko umetaka koji su djelomično uronjeni u ljepilo [17]

- Koncentrirani (lokalni) momenti se prenose preko prolaznih umetaka na ljuske sendviča (Slika 23).



Slika 23. Prijenos momenta preko potpuno prolaznog umetka [17]

- Kod djelovanja smičnog opterećenja na umetak blizu ruba postoji opasnost da ljuska sendviča pukne (Slika 24).



Slika 24. Pucanje ljuske sendviča [17]

5. IZRADA SENDVIČ PANELA S UMETCIMA

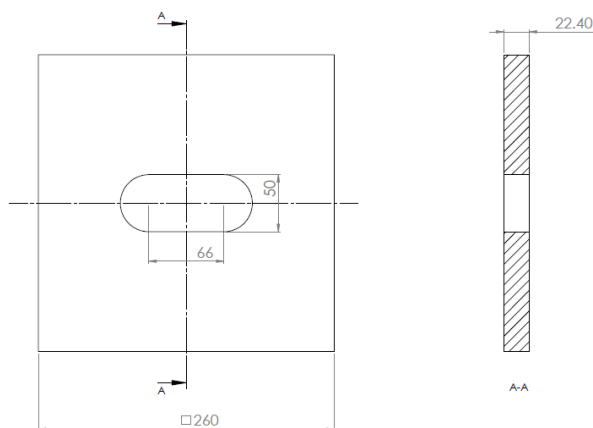
5.1. Odabir materijala

Materijali korišteni pri izradi uzoraka su sljedeći:

- ispunjena od aluminijskih saća debljine 20 mm, gustoće 50 kg/m^3 , veličina ćelije je 3,2 mm,
- karbonski prepreg oznake DF322-C375T-T700-12K-38%RW-1250, efektivne gustoće 595 g/m^2 ,
- karbonski prepreg oznake DF322-C200T-HS-3K-42%-1250 efektivne gustoće 345 g/m^2 ,
- umetci od aluminijske legure 6082,
- umetci od brezove šperploče,
- adhezivni film,
- vijci M10 i M12 te pripadajuće standardne matice i podloške,
- podloške promjera 35 mm i debljine 1,5 mm,
- tekućina za čišćenje kalupa CLEANER EZ, premaz SEALER EZ i odjeljivač PMR-90 EZ,
- drvene letvice.

5.2. Dimenzije uzoraka

Dimenzije ispitnih uzoraka za testiranje iznose $260 \times 260 \times 22,4 \text{ mm}$ prema slici 25, a izrezani su iz sendvič konstrukcije dimenzije $300 \times 300 \times 22,4 \text{ mm}$.


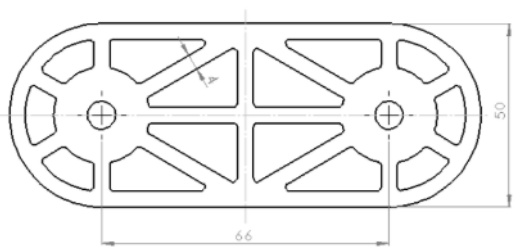
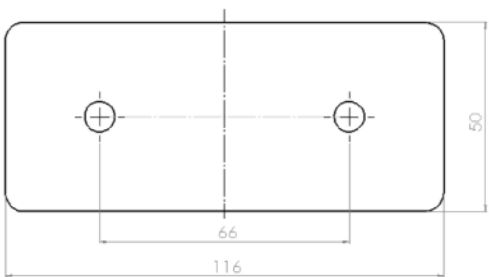
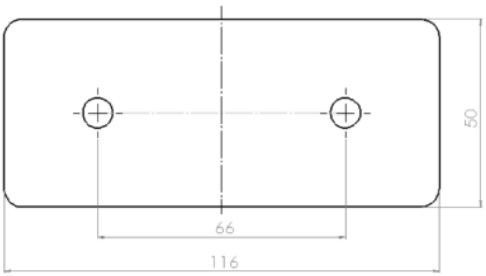


Slika 25. Dimenzije ispitnog uzorka izrezanog iz sendvič konstrukcije

5.3. Pregled umetaka za uzorke sendvič konstrukcija

Za ispitivanje je izrađeno ukupno 14 uzoraka sendviča. U tablici 5 dan je pregled umetaka koji su ispitani te njihove oznake. Svi umetci su debljine 20 mm.

Tablica 5. Ispitani umetci

OZNAKA UMETKA	MATERIJAL	DIMENZIJE	KOLIČINA
A	Aluminijska legura 6082		6
B	Aluminijska legura 6082		6
C	Brezova šperploča		2
D	Brezova šperploča		2

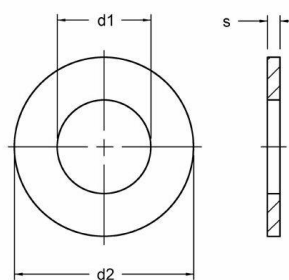
U ispitnim uzorcima u kojima je postavljen umetak tipa D, stavljen je dodatan sloj preprega oko umetka (Slika 26).



Slika 26. Presjek umetka tipa D

5.4. Pregled podloški u uzorcima sendvič konstrukcija

Korištena su dva tipa podloški oblika prema slici 27. Dimenzije su dane u tablici 6.



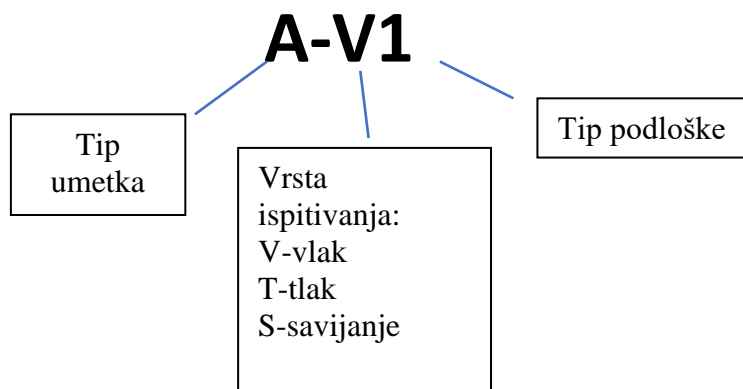
Slika 27. Dimenzije podloške

Tablica 6. Dimenzije podloški

TIP	PODLOŠKA 1		PODLOŠKA 2	
NORMA	DIN 125		IM 10342	
ZA VIJAK	M10	M12	M10	M12
d_1 mm	10.5	13	10.5	12.5
d_2 mm	20	24	35	35
s mm	2	2.5	1.5	1.5

5.5. Označavanje uzoraka

Radi preglednosti uvedene su oznake uzoraka kojima se ujedno označuje i koji je tip umetka u uzorku, tip podloški na uzorku te na koji način je opterećen uzorak tijekom ispitivanja (Slika 28).



Slika 28. Oznake uzoraka

5.6. Izrada uzoraka

Kako bi se dobili uzorci željenih dimenzija, prepreg je odrezan na dimenzije 300x300 mm. Nakon slojeva preprega pripremljene su ploče od nehrđajućeg čelika koje su služile kao radna površina.

Za pripremu radne površine korišteno je sredstvo za čišćenje CLEANER EZ kojim se uklanjaju sve nečistoće s radne površine, premaz SEALER EZ kojim se smanjuje poroznost radne površine te odjeljivač PMR-90 EZ kojim se osigurava odvajanje kompozita od radne površine nakon umrežavanja.

Priprema radne površine se sastoji od tri koraka:

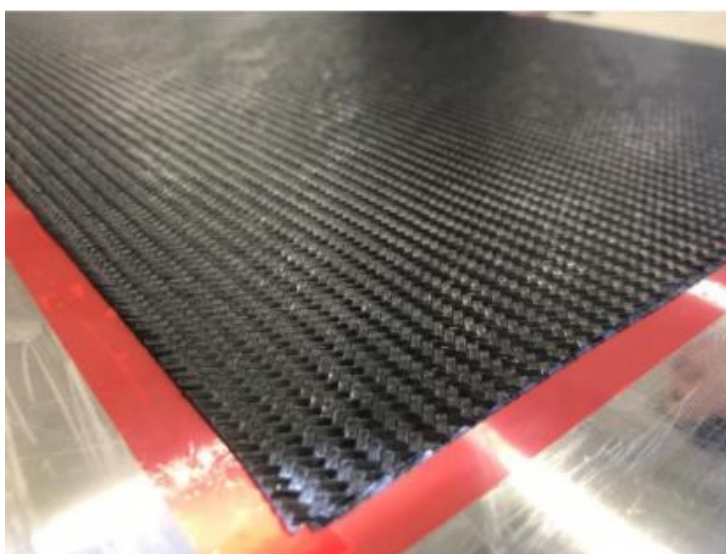
1. sredstvo za čišćenje CLEANER EZ se uz korištenje rukavica sa suhom krpicom nanosi na površinu ploče i očistiti se od nečistoća,
2. premaz SEALER EZ se nanosi na krpicu (ne na ploču) i ravnomjerno razmaže po ploči da se dobije tanki sloj te se nakon jedne minute prebriše drugom suhom krpicom i ostavi da se suši 20 minuta,
3. odjeljivač PMR-90 se na ploču nanosi istim postupkom kao i 2. sredstvo i također se ostavi 20 min da se posuši.

Na slici 29. prikazan je drugi korak pripreme radne površine.



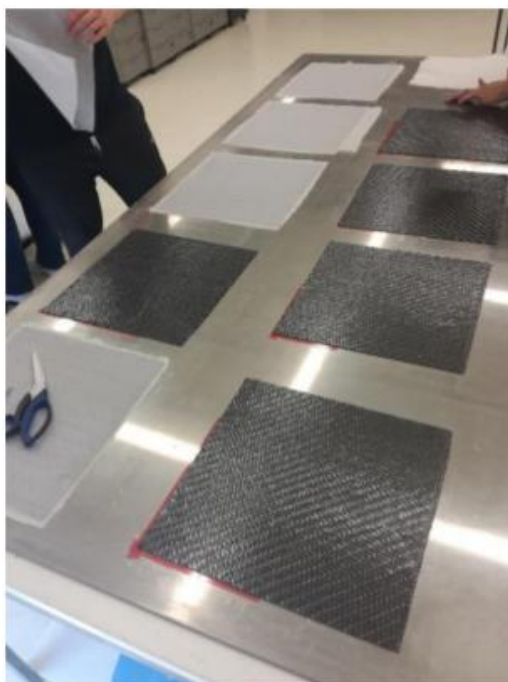
Slika 29. Priprema radne površine

Na mjesta gdje se postavljaju slojevi preprega, na radnu ploču se lijepi crvena traka u obliku slova „L“ (Slika 30), kako bi se nakon umrežavanja kompozit lakše odvojio od ploče.



Slika 30. Postavljeni prepreg prve kore

Nakon slaganja prve kore, slijedi nanošenje zaštitne tkanine (engl. *peel-ply*) koji ima funkciju zaštite površine kore od „breather-a“ (Slika 31). Zaštitnu tkaninu je potrebno izrezati na veličinu da neznatno prelazi preko ruba kore.



Slika 31. Postavljanje tkanine za odijeljivanje

Nakon toga se postavlja odjeljivač (eng. *release film*) na svaki uzorak pojedinačno. Odjeljivač ima funkciju širenja smole te odvaja laminat od *breather*-a. Kako bi se osigurao položaj odjeljivača tijekom vakuumiranja zalijepljen je za radnu ploču (Slika 32). Dimenzije odjeljivača su malo veće od dimenzija zaštitne tkanine.



Slika 32. Postavljanje odjeljivača prije prvog umrežavanja

Sljedeći korak je postavljanje *breather* tkanine preko cijele radne površine (Slika 33). *Breather* tkanina omogućuje ravnomjeran pritisak po cijeloj površini i osigurava prolazak plinova kroz laminate tijekom umrežavanja.



Slika 33. Postavljanje *breather* tkanine

Nakon postavljanja *breater* tkanine, potrebno je sve prekriti vakuum vrećom u kombinaciji sa zaptivnom trakom. Posljednji korak je bušenje rupe za ventil. Prije stavljanja uzoraka u autoklav, potrebno je provjeriti je li osiguran vakuum unutar vreće. To se ispituje na način da se izvuče zrak kao što je prikazano na slici 34, a potom se manometrom provjeri tlak unutar vreće (Slika 35).

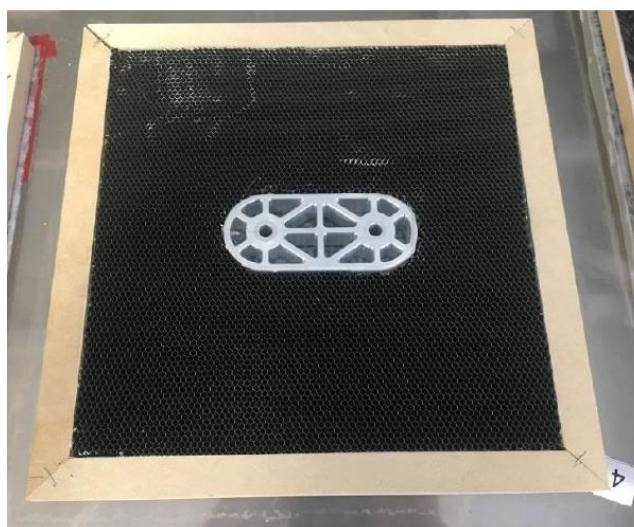


Slika 34. Vakuumiranje laminata



Slika 35. Mjerenje tlaka unutar vakuum vreće

Nakon izrađene prve kore uzorka slijedi slaganje adhezivnog filma. Adhezivni film je odrezan na dimenzije prve kore. Na adhezivni film se potom postavlja ispuna u kojoj je prethodno izrezana rupa za umetak. Oko ispune je postavljen okvir izrađen od drvenih letvica (Slika 36).



Slika 36. Pozicionirani umetak unutar sendviča

Površine aluminijskih umetka se prethodno moraju pobrusiti (Slika 37) kako bi se što bolje zalijepile za površine jezgre i kora.



Slika 37. Obradena i neobrađena površina umetka

Adhezivni film je postavljen na stranicama drvenih letvica koje su uz saće, na bočnim stranama umetka te na cijelu površinu sendviča na koju će biti postavljena druga kora. Kod umetaka s dodatnim slojem preprega adhezivni sloj je postavljen samo preko površine sendviča gdje se postavlja druga kora (Slika 38).



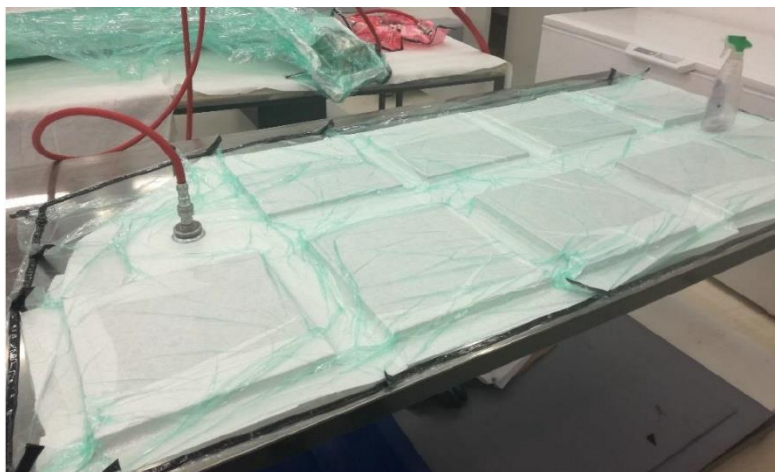
Slika 38. Pozicionirani umetak tipa D

Preko cijele površine sendviča posloženi su slojevi preprega koji čine drugu koru. U sljedećem koraku uzorci su uz stranice sendviča omotani *release* filmom koji je zalijepljen za podlogu kao što je prikazano na slici 39.



Slika 39. Postavljanje release filma prije drugog umrežavanja

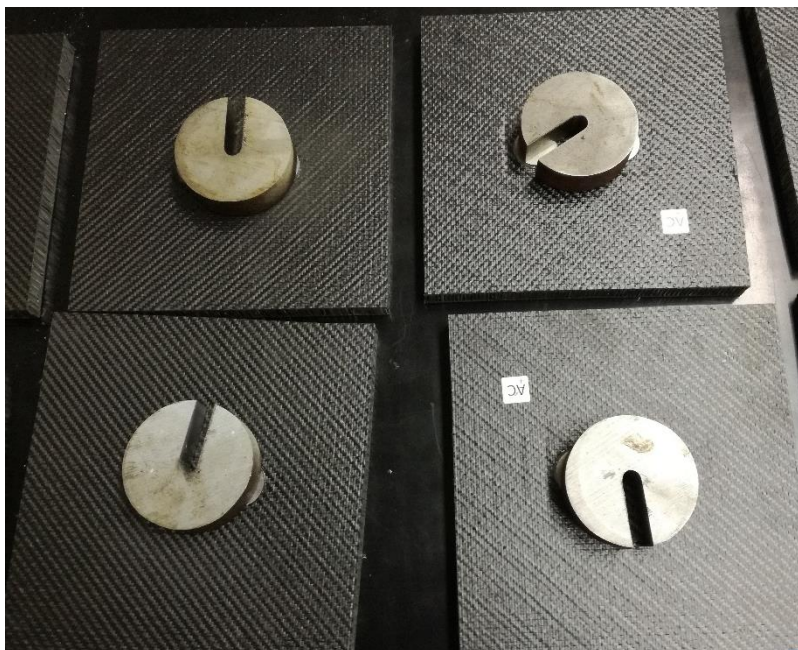
Na *release* film se slaže breather. Na uzorke se stavlja mala količina ljepila u spreju, tek toliko da drži *breather* tkaninu na mjestu. Zbog oštih rubova postavljen je dodatni sloj *breather* tkanine kako ne bi došlo do oštećenja vakuum vreće. Između uzoraka su postavljeni dodatni komadi *breather* tkanine, tzv. „rukavci“, da bi se što brže postigao vakuum i dobio što kvalitetniji proizvod. Zadnji dio pripreme za drugo umrežavanje je stavljanje vakuum vreće te vakuumiranje (Slika 40). Provjera vakuum vreće vrši se na isti način kao i prije prvog umrežavanja. Ako se tlak stabilizirao, vreća je dobro postavljena na ploču te su uzorci spremni za umrežavanje.



Slika 40. Vakuumiranje uzoraka prije drugog umrežavanja

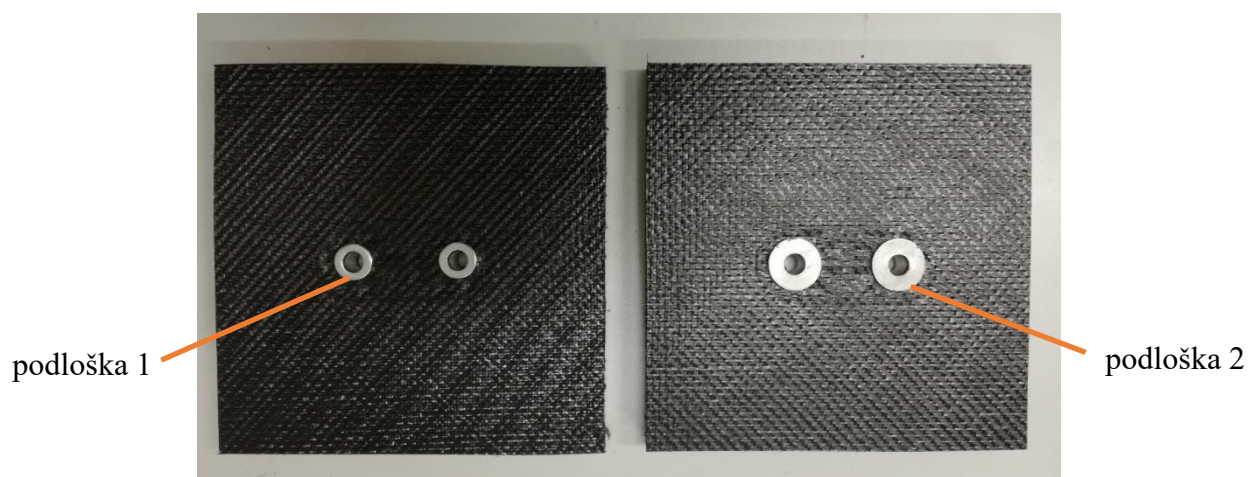
Nakon što su uzorci umreženi u autoklavu, uklonjene su drvene letvice rezanjem uzoraka tračnom pilom na unaprijed definirane dimenzije. Nakon što su uzorci izrezani, na sendvičima su probušeni provrti za vijke M10 za tlačno i vlačno opterećenje i M12 za opterećenje na savijanje.

Radi sprječavanja dizanja ruba podloški 2 uslijed djelovanja sile, zalijepljene su za uzorak dvokomponentnim ljepilom Loctite EA 3423. Pomoću utega osigura je dostatan pritisak za dobivanje kvalitetnog lijepljenog spoja između podloški i uzoraka (Slika 41).



Slika 41. Lijepljenje podloški za uzorke

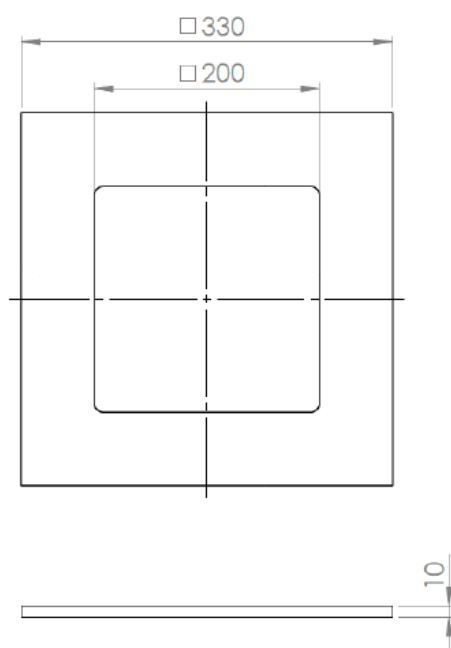
Na slici 42 prikazan je uzorak sa zalijepljenim podloškama 1 i 2.



Slika 42. Uzorci s podloškama

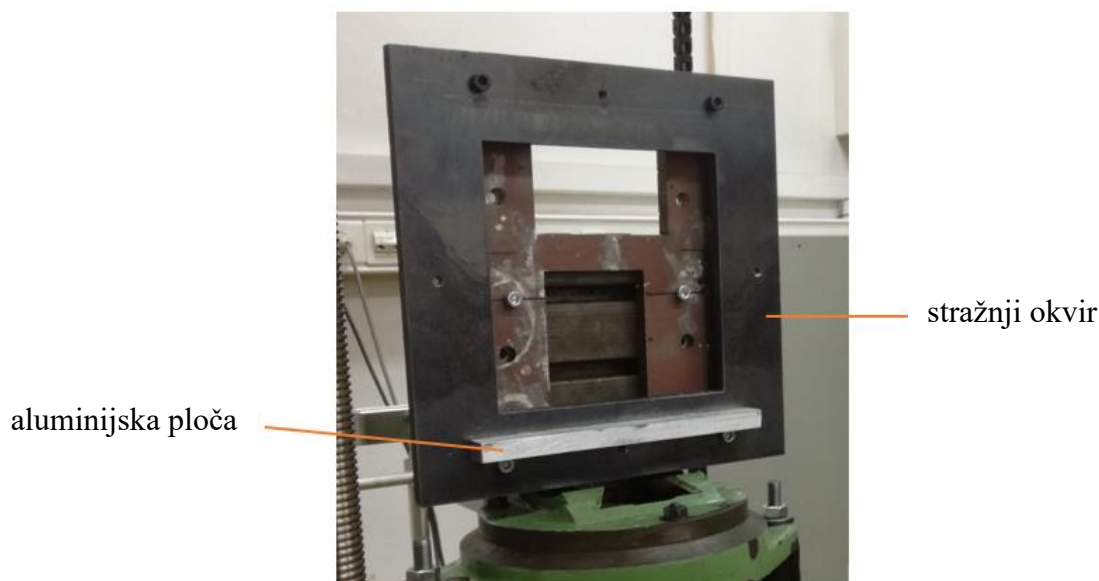
5.7. Priprema uzoraka za ispitivanje

Budući da je kod ispitivanja predviđeno opterećivanje uzoraka na savijanje te na tlak i vlak, potrebno je pripremiti i odgovarajuće prihvate uzoraka na statičkoj kralnici *Beta 50-5* (Messphysik, Austrija) koji će fiksirati sklop umetka i kompozitne strukture kod sva tri slučaja opterećenja. U tu svrhu su pripremljena dva čelična okvira dimenzija prema slici 43.



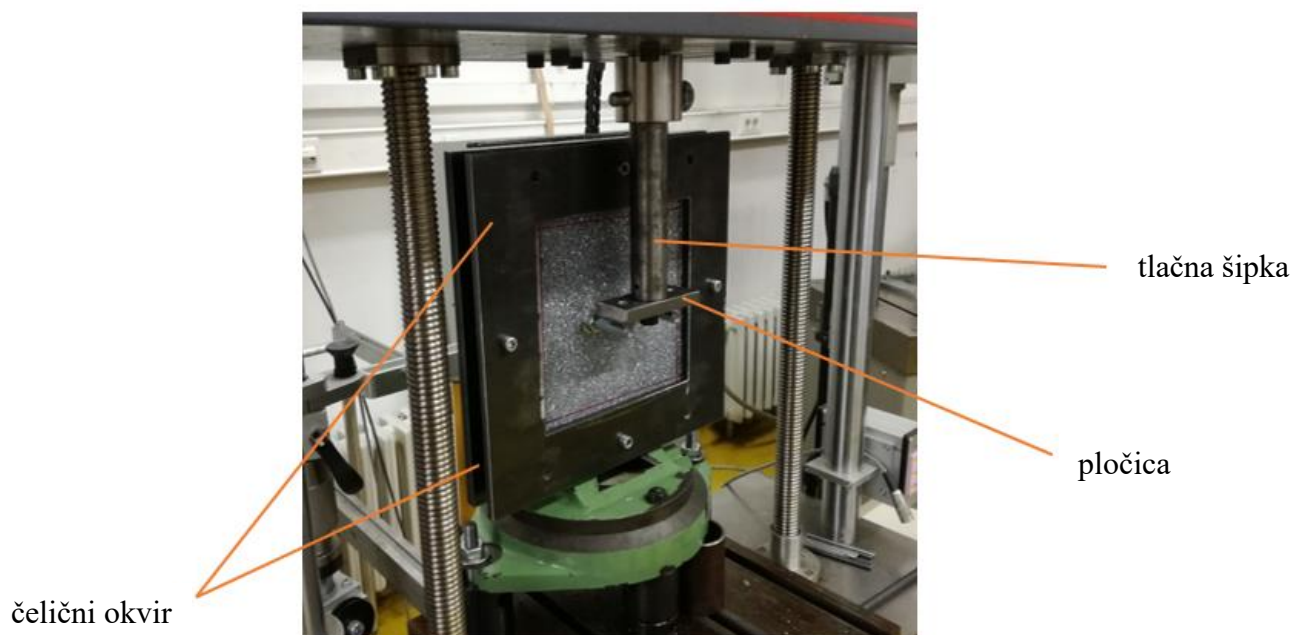
Slika 43. Dimenzije čeličnog okvira

Za opterećivanje uzoraka na savijanje okviri su postavljeni vertikalno. Kao oslonac uzorka korištena je aluminijska ploča koja se oslanjala na dva vijka koji su spojeni na stražnji okvir (Slika 44).



Slika 44. Okvir za opterećenje uzoraka na savijanje

Opterećivanje kod savijanja se vršilo tlačnom šipkom na koju je vijkom spojena čelična pločica koja je savijala dva M12 vijka učvršćena u uzorku (Slika 45). Čelični okviri koji su pridržavali uzorak spojeni su s četiri M8 vijaka.



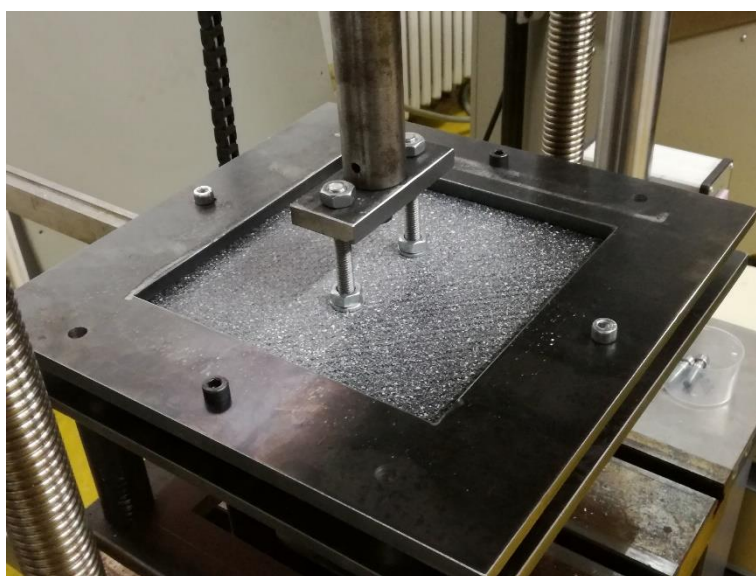
Slika 45. Opterećivanje uzoraka na savijanje

Za tlačno i vlačno opterećenje uzoraka korištena je ista šipka kao i kod savijanja s čeličnom pločicom za prihvata dva M10 vijka koji prolaze kroz uzorak. Kod tlačnog opterećenja uzorak je postavljen na horizontalnu čeličnu ploču. Postav kod opterećivanja uzoraka na tlak prikazan je na slici 46.



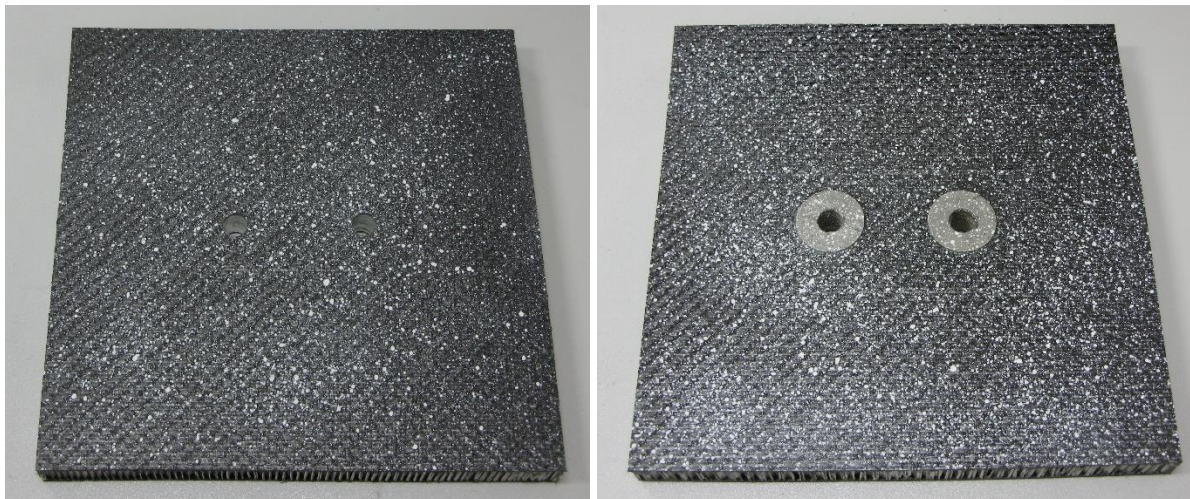
Slika 46. Ispitivanje uzoraka na tlak

Kod vlačnog opterećivanja uzorci su postavljeni između dvije čelične ploče koje su spojene s četiri M8 vijaka (Slika 47).



Slika 47. Ispitivanje uzoraka na vlak

Posljednji korak prije samog testiranja je nanošenje boje na ispitni uzorak kako bi se pomoću mjernog sustava *Aramis*, koji je objašnjen u sljedećem poglavlju, moglo odrediti polje pomaka i deformacija na mjestu spoja umetka i kompozitne strukture. Na uzorke je pomoću spreja nanjena bijela boja kako bi se na površini uzorka dobile bijele točkice na crnoj podlozi. Na slici 48 prikazani su uzorci nakon nanošenja rastera.



Slika 48. Uzorci nakon nanošenja stohastičkog rastera

6. EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE

6.1. Optički mjerni sustav Aramis

Aramis je beskontaktni optički 3D mjerni sustav (GOM GmbH, Njemačka) (Slika 49) koji analizira, izračunava i dokumentira pomake i deformacije. Služi za mjerenja trodimenzionalne promjene oblika i raspodjele pomaka i deformacija na površini statički ili dinamički opterećenih objekata. Primjenjuje se za analizu čvrstoće konstrukcija, određivanje svojstava materijala, verifikaciju i usavršavanje numeričkih proračuna, itd. Prikladan je za analizu objekata iz metalnih, kompozitnih, gumenih, drvenih i drugih materijala.



Slika 49. Optički sustav *Aramis* [19]

Za razliku od tenzometra ili ekstenzometra koji daju samo pojedinačne mjerne vrijednosti, *Aramis* određuje raspodjelu pomaka i deformacija po cijelom analiziranom području, što omogućuje bolje razumijevanje ponašanja i odziva materijala i konstrukcija kod narinutog opterećenja.

Aramis prepoznaje površinsku teksturu mjernog objekta u digitalnim slikama te svakom piksel na slici dodjeljuje koordinate. Prva slika u projektu mjerenja predstavlja nedeformirano stanje

objekta. Nakon ili tijekom deformiranja mjernog objekta dodatno se snimaju slike iz kojih sustav uspoređujući digitalne slike izračunava pomake i deformacije mjerenog objekta.

6.1.1. Postupak snimanja uzoraka mjernim sustavom Aramis

Ovdje su ukratko opisani koraci postupka snimanja i dobivanja rezultata mjerenja, a isti će biti opširnije opisani u nastavku. Koraci su sljedeći:

- definiranje mjernog volumena,
- priprema mjernog objekta koja se sastoji od nanošenja umjetne teksture na površinu uzorka,
- kalibracija mjernog sustava,
- podešavanje parametara snimanja,
- snimanje uzoraka tijekom mjerenja,
- definiranje veličine fasete na snimljenim digitalnim slikama,
- računanje projekta,
- odabir načina prezentacije rezultata,
- dokumentiranje rezultata.

Priprema mjernog objekta važan je dio kod obavljanja mjerenja. Površina mjernog objekta sa siromašnom prirodnom teksturom ili s nedovoljno kontrastnim umjetno nanesenom teksturom (rasterom) mogu znatno utjecati na rezultat. Zato je potrebno da površina mjernog objekta ispunjava sljedeće uvjete:

- Površina mjernog objekta mora imati uzorak prepoznatljiv senzoru kako bi jasno mogao izdvojiti piksele u slici (fasete).
- Raster (prirodni ili umjetni) na površini uzorka mora biti u stanju pratiti deformacije na površini uzorka.
- Površina uzorka ne smije biti reflektirajuća, a raster treba biti što nepravilniji da su fasete (grupa piksela) čija središta ujedno predstavljaju mjerne točke u svakom trenutku opterećivanja međusobno različite i algoritmu sustavu prepoznatljive.
- Raster na površini uzorka treba biti dovoljno kontrastan.

Izgled rastera za uspješnu provedbu mjerenja ovisno o veličini mjernog volumena definiran je od strane proizvođača sustava.

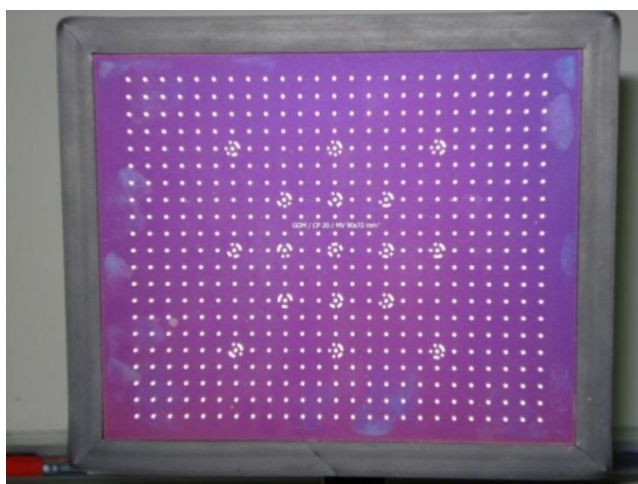
6.1.2. Nanošenje stohastičkog rastera

Prije nanošenja stohastičkog rastera potrebno je površinu mjernog objekta očistiti. Pri nanošenju boje obično se prvo nanosi nereflektirajuća mat bijela boja, ako je mjerni objekt reflektirajući. Za razliku od velikih, kod manjih mjernih volumena raster mora biti finiji i gušći. Kako je kod ispitivanih uzoraka površina crna, umjetna tekstura je dobivena nanošenjem bijele boje na crnu podlogu čime je dobiven efekt bijelih točkica na crnoj podlozi. Na slici 50 prikazan je uzorak s nanesenim rasterom.



Slika 50. Stohastički raster na površini uzorka

Prije početka ispitivanja potrebno je kalibrirati mjerni sustav. Kalibracija služi kako bi se podesili unutarnji i vanjski parametri kamere, te se poništile sve nepravilnosti u kameri koje mogu biti uzrokovane okolinom u kojoj se provodi mjerenje. Nepravilnosti mogu biti neprikladan prostor ispitivanja (zadimljen ili prašnjav prostor, prepreke između mjernog objekta i kamere kao što je staklo) ili na samim kamerama (nečiste leće ili polarizacijska stakla). Za kalibriranje mjernog sustava *Aramis* koriste se kalibracijski objekti različitih veličina ovisno o veličini mjernog volumena: kalibracijske ploče za male volumene i kalibracijski štapovi za veće volumene. Kalibracijski objekt korišten u ovom radu prikazan je na slici 51.

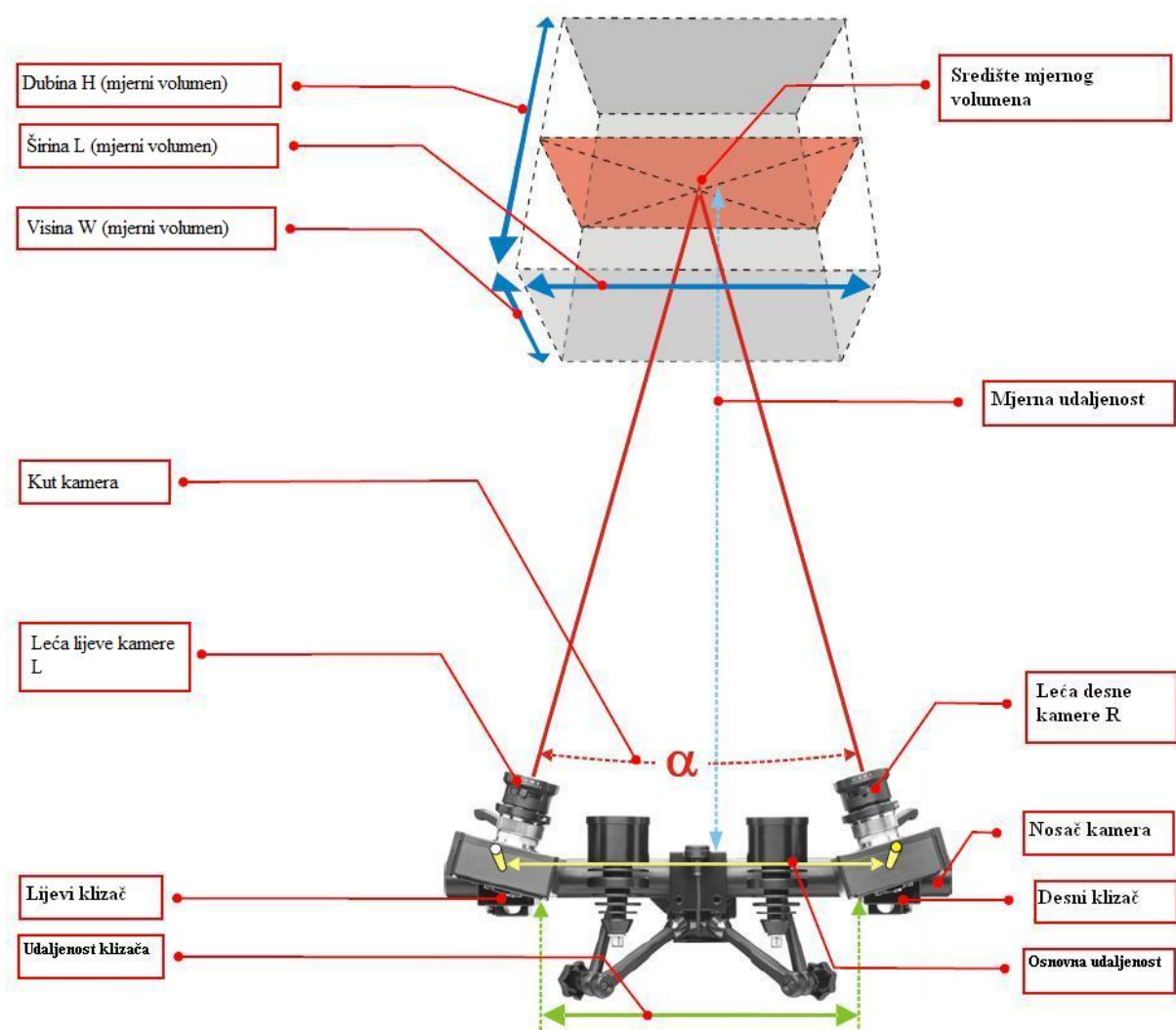


Slika 51. Kalibracijski objekt

Parametri koje je potrebno namjestiti prije svakog mjerenja su mjerni volumen, otvor blende, fokus kamere koji podešava oštrinu slike te polarizacijska stakla koja se nalaze na kamerama i izvorima svjetla i omogućuju smanjenje neželjene refleksije s površine objekta. Parametri sustava podešavaju se prema uputama proizvođača i prikazani su na slici 52. U tablici 7 prikazani su podešeni parametri sustava prije mjerenja.

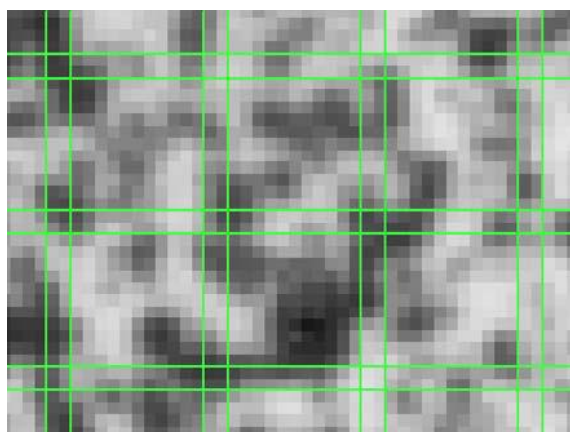
Tablica 7. Parametri kalibracijskog objekta

Kalibracijski objekt		Ploča (kodirana)
Tip objekta		CP20/MV90x72
Kalibracijska skala	Udaljenost 1	83.000 mm
	Udaljenost 2	83.000 mm
Promjer leća kamera		50.00 mm
Devijacija kalibracije		0.022 piksela
Kut mjerenja		26.7°
Visina mjerenja		62 mm
Mjerni volumen		135 / 100 / 80 mm



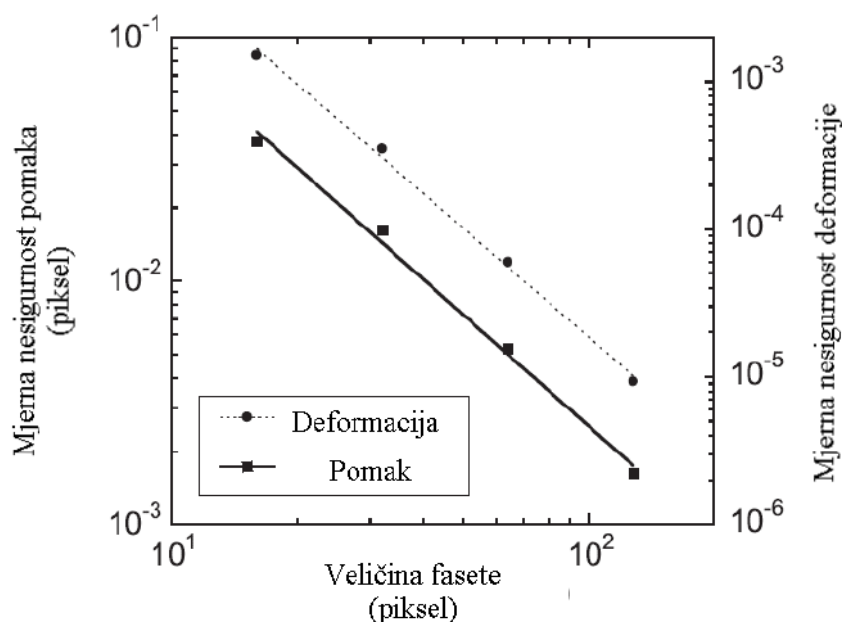
Slika 52. Ilustracija sustava Aramis s potrebnim parametrima za podešavanje [19]

Veličina fasete i *korak* definiraju se softverski pri obradi digitalnih slika. Prikazana faseta na slici 53 je veličine 15x15 piksela s 2 piksela preklapanja u nedeformiranom stanju.



Slika 53. Faseta veličine 15x15, s 2 preklapajuća piskela [19]

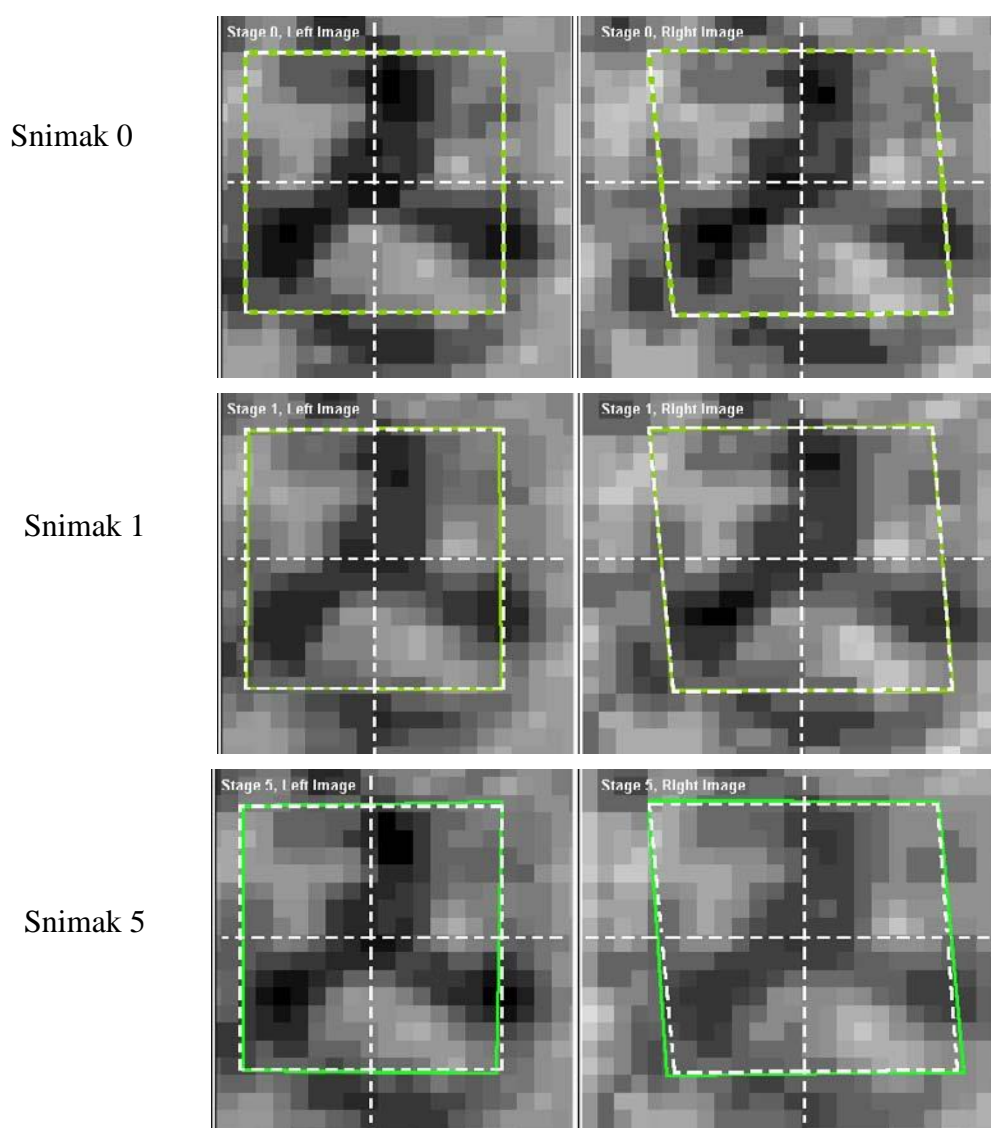
Fasete se identificiraju i prate s pomoću stupnja intenziteta nijansi sive boje tijekom različitih koraka opterećenja. Povećanje faseta ima za posljedicu smanjenje mjerne nesigurnosti mjerenja, što se vidi na slici 54, no izračun postaje računalno zahtjevniji i ne mogu se odrediti lokalne promjene – pomak i deformacija koji se pojavljuju u zonama manjima od veličine fasete. S druge strane, smanjenje veličine faseta omogućuje praćenje lokalnih promjena, vrijeme izračuna postaje kraće, a mjerna nesigurnost se povećava. Što se tiče koraka fasete, njegovim povećanjem smanjuje se gustoća mjernih točaka, a posljedica je kraće trajanje izračuna pomaka i deformacija, za razliku od smanjenja koraka fasete gdje se povećava gustoća mjernih točaka, što čini izračun računalno zahtjevnijim.



Slika 54. Ovisnost mjerne nesigurnosti pomaka i deformacije o veličini fasete [20]

Na slici 55 prikazan je primjer faseta kroz broj snimke 0-5 (15x15 piksela) od desne i lijeve kamere. Promatrane vrijednosti su označene kroz 6 stupnjeva deformacije a to su koraci od 0 do 5. Korak 0 predstavlja referentno nedeformirano stanje, a korak 5 predstavlja konačno deformirano stanje. Zorno prikazana isprekidana bijela linija prikazuje nedeformirano stanje kako bi se jasno usporedio odnos između fasete i deformacije.

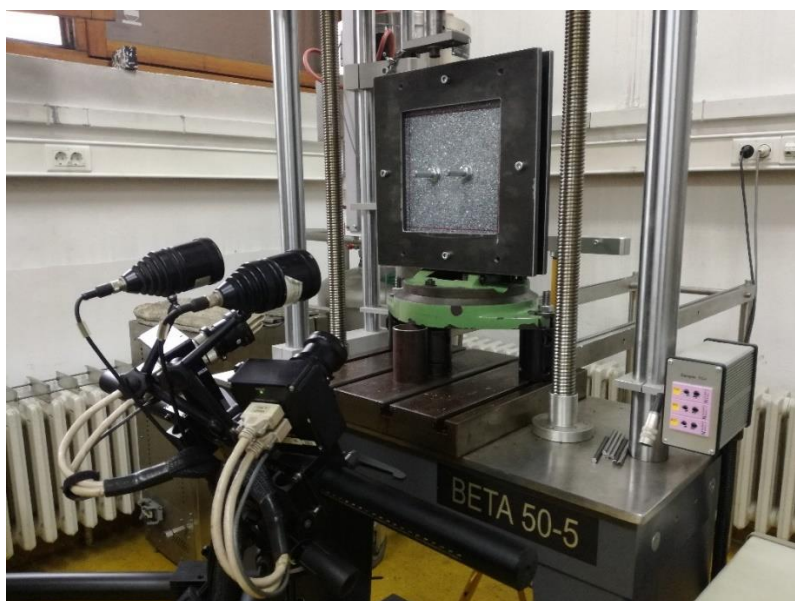
Iz kutnih točaka i središta zelene fasete prikazanih na slici 55, algoritam određuje 2D koordinate te fasete. Kako se iste fasete promatraju iz lijeve i desne kamere, upotrebom fotogrametrijskih postupaka dobiva se zajednička 3D koordinata. Nakon izračuna pomaka i deformacija dobiveni rezultat dostupan je kao 3D prikaz [20].



Slika 55. Prikaz faseta od snimke 0-5 [19]

6.2. Ispitivanje uzoraka pri opterećenju na savijanje

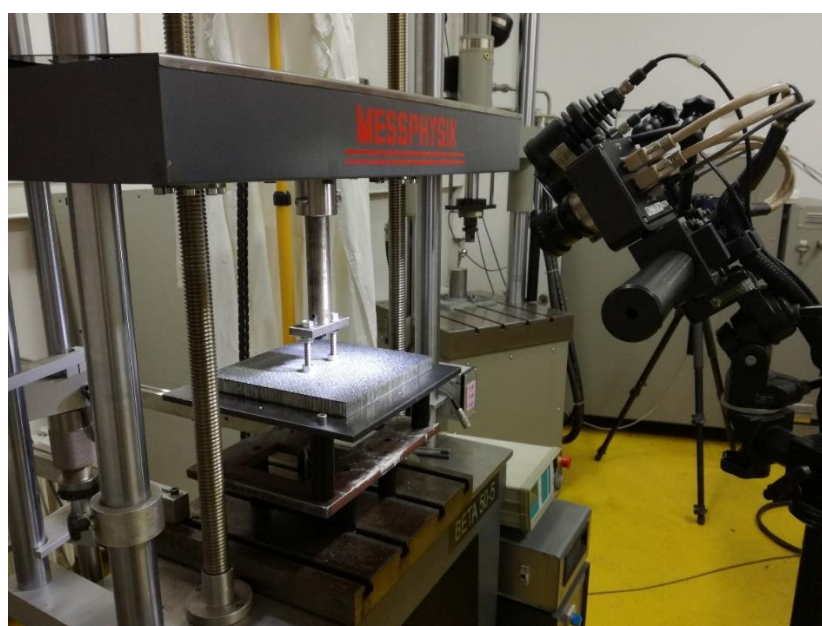
Cilj ovog ispitivanja je određivanje kritične sile opterećenja koja dovodi do narušavanja integriteta kompozitne konstrukcije. Ispitivanje je provedeno sa šest uzoraka s oznakama A-S1, A-S2, B-S1, B-S2, C-S2 i D-S2, uz brzinu opterećivanja 3,5 mm/min. Krak sile koja djeluje na uzorak iznosio je 22,4 mm. Na slici 56 prikazan je uzorak pozicioniran na kidalici zajedno s postavljenim sustavom *Aramis* za mjerenje pomaka tijekom opterećivanja uzorka.



Slika 56. Eksperimentalni postav kod ispitivanja uzoraka pri savijanju

6.3. Ispitivanje uzoraka pri tlačnom opterećenju

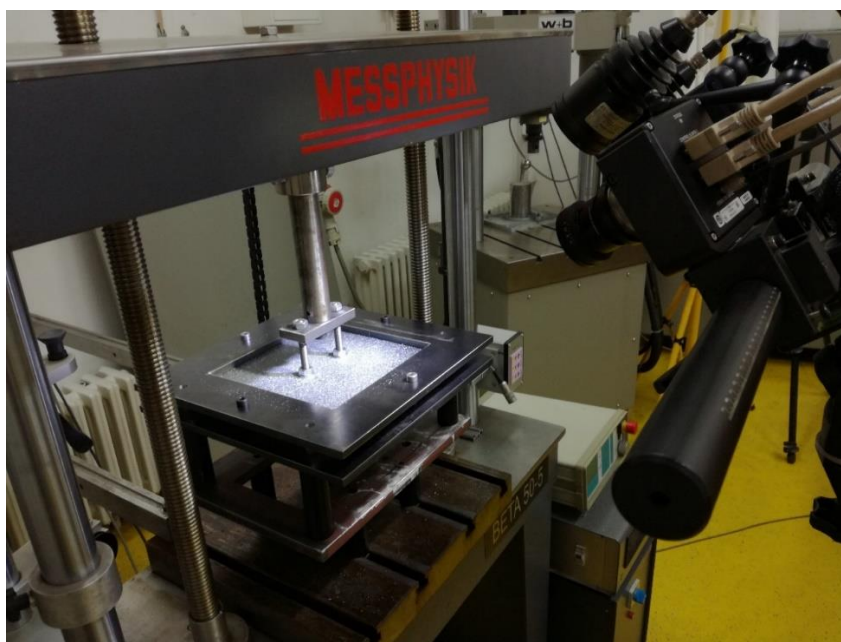
Cilj ovog ispitivanja je određivanje kritične tlačne sile koja dovodi do narušavanja integriteta kompozitne konstrukcije. Ispitivanje je provedeno s četiri uzorka s oznakama A-T1, A-T2, B-T1 i B-T2. Brzina opterećivanja je iznosila 3,5 mm/min. Na slici 57 prikazan je način opterećivanja uzoraka zajedno s postavljenim mjernim sustavom *Aramis*.



Slika 57. Eksperimentalni postav za ispitivanje uzoraka pri tlačnom opterećenju

6.4. Ispitivanje uzoraka pri vlačnom opterećenju

Cilj ovog ispitivanja je određivanje kritične vlačne sile koja dovodi do narušavanja integriteta kompozitne konstrukcije. Ispitivanje je provedeno sa 6 uzoraka s oznakama A-V1, A-V2, B-V1, B-V2, C-V2, D-V2. Brzina opterećivanja je kao i kod tlačnog ispitivanja iznosila 3,5 mm/min. Na slici 58 prikazan je eksperimentalni postav pri provedbi vlačnog ispitivanja uzoraka.



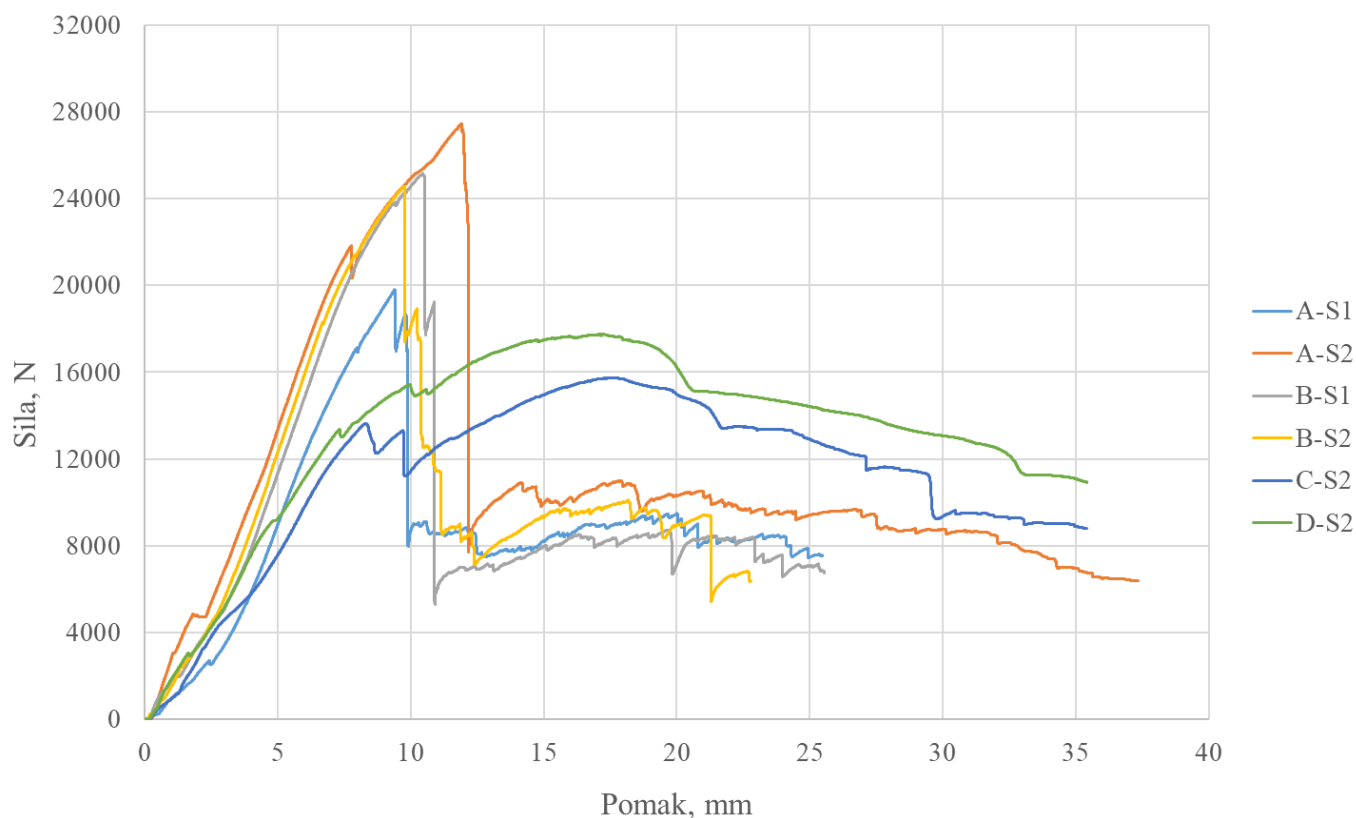
Slika 58. Eksperimentalni postav kod vlačnog ispitivanja uzoraka

7. REZULTATI

7.1. Rezultati ispitivanja uzoraka pri opterećenju na savijanje

Na slici 59 prikazan je dijagram sila-pomak za uzorke A-S1, A-S2, B-S1, B-S2, C-S2 i D-S2.

U tablici 8. prikazani su iznosi kritičnih opterećenja pri savijanju za svih 6 uzoraka.



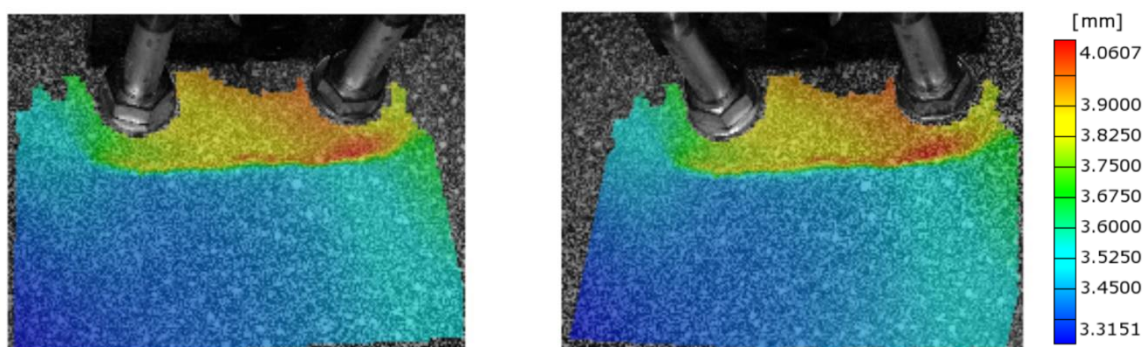
Slika 59. Dijagram sila-pomak za uzorke A-S1, A-S2, B-S1, B-S2, C-S2, D-S2 pri savijanju

Tablica 8. Iznos maksimalne sile i momenta savijanja

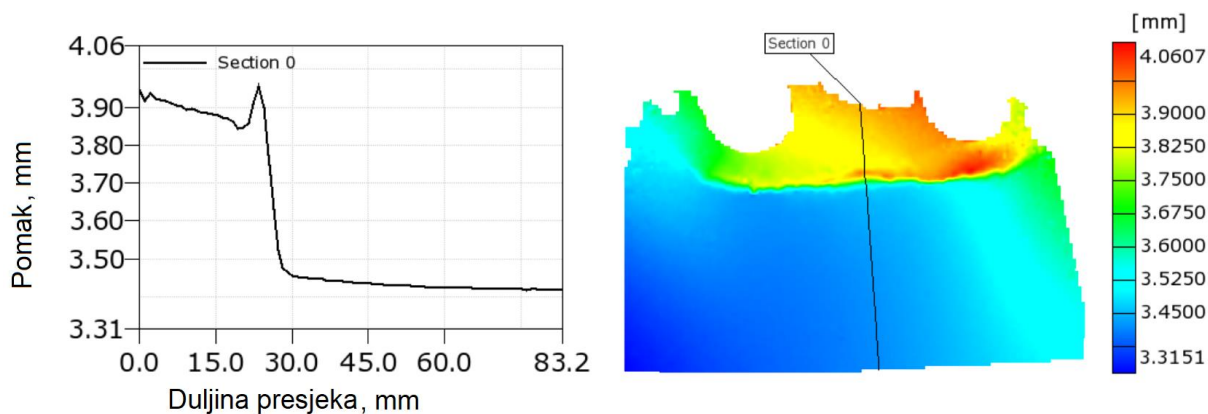
Uzorak	F_{\max} N	M_{\max} Nm
A-S1	19801	443,5
A-S2	27450	614,9
B-S1	25158	563,5
B-S2	24566	550,3
C-S2	15740	352,6
D-S2	17743	397,4

7.1.1. Pomaci i deformacije uzoraka pri savijanju

Jedan od ciljeva u ovom radu je bilo i određivanje polja pomaka i deformacija na mjestu spoja umetka i kompozitne strukture. Za brzinu snimanja tijekom provedbe mjerenja odabran je jedan snimak svake druge sekunde. Veličina fasete kod izračunavanja pomaka u sustavu *Aramis* podešena je na 25 x 20 piksela, sa pet preklapajućih piksela. Na slici 60 prikazano je polje pomaka uzorka A-S1 snimljeno lijevom i desnom kamerom u 176. sekundi ispitivanja. Na slici 61 prikazan je iznos pomaka po presjeku uzorka u 176. sekundi ispitivanja.

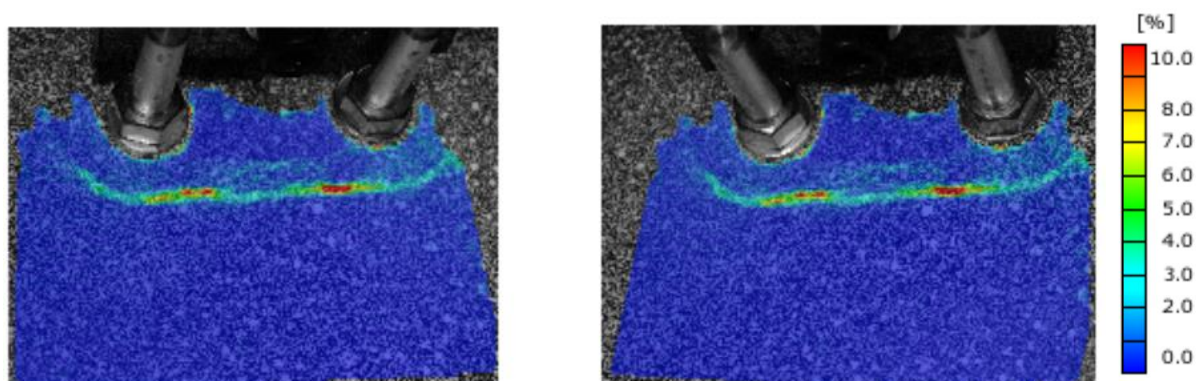


Slika 60. Polje pomaka za uzorak A-S1



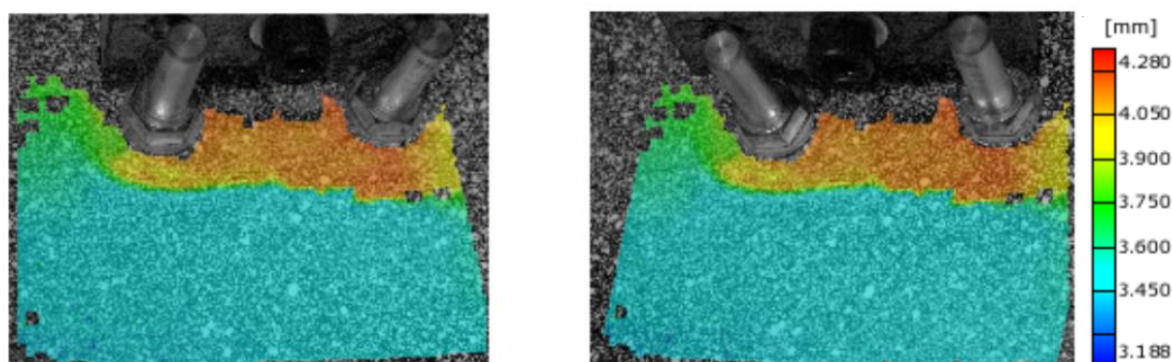
Slika 61. Dijagram pomak-duljina presjeka za uzorak A-S1

Zbog velikog broja uzoraka u radu su prikazane samo snimke polja deformacija pojedinih uzoraka u odabranom koraku ispitivanja. Polje deformacija po von Misesu za uzorak A-S1 u 176. sekundi ispitivanja prikazano je na slici 62.

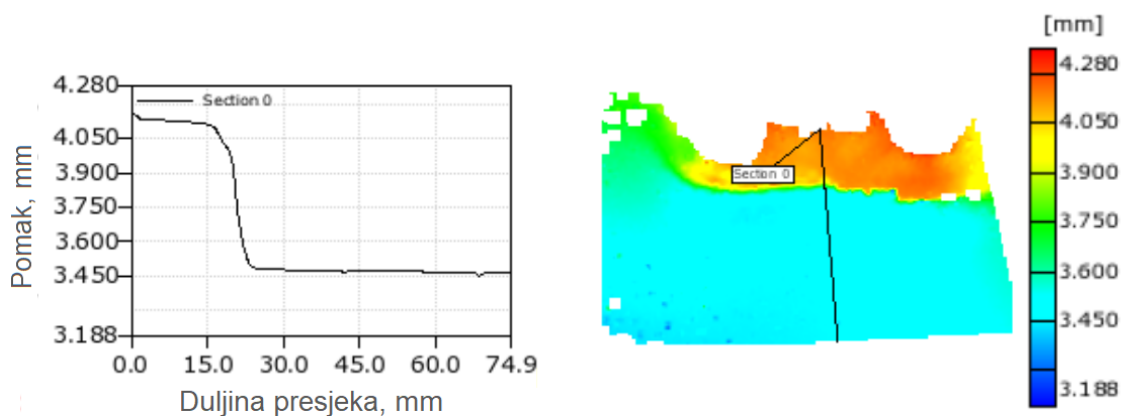


Slika 62. Polje deformacija za uzorak A-S1

Na slici 63 prikazano je polje pomaka uzorka B-S1 snimljeno lijevom i desnom kamerom u 194. sekundi testiranja, dok je na slici 64 prikazan iznos pomaka po presjeku uzorka.

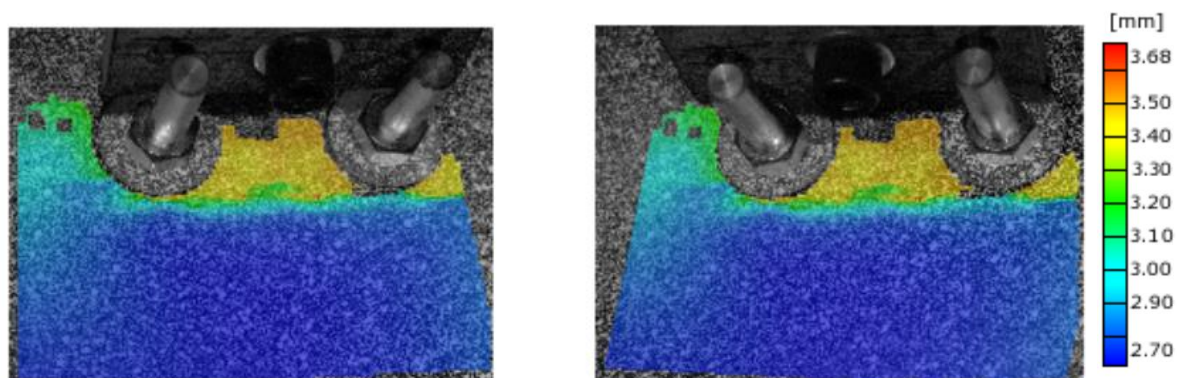


Slika 63. Polje pomaka za uzorak B-S1

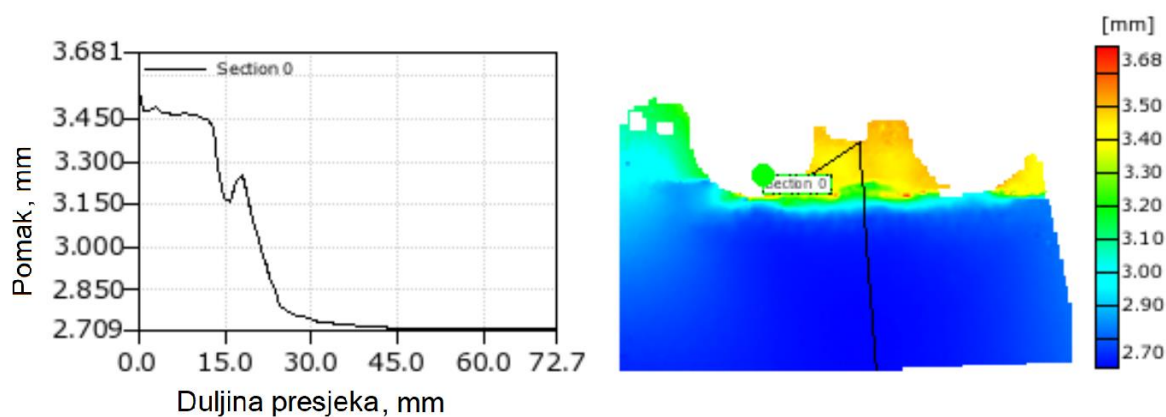


Slika 64. Dijagram pomak-duljina presjeka za uzorak B-S1

Na slici 65 prikazano je polje pomaka uzorka B-S2 snimljeno lijevom i desnom kamerom u 176. sekundi testiranja. Na slici 66 prikazan je iznos pomaka po presjeku uzorka.

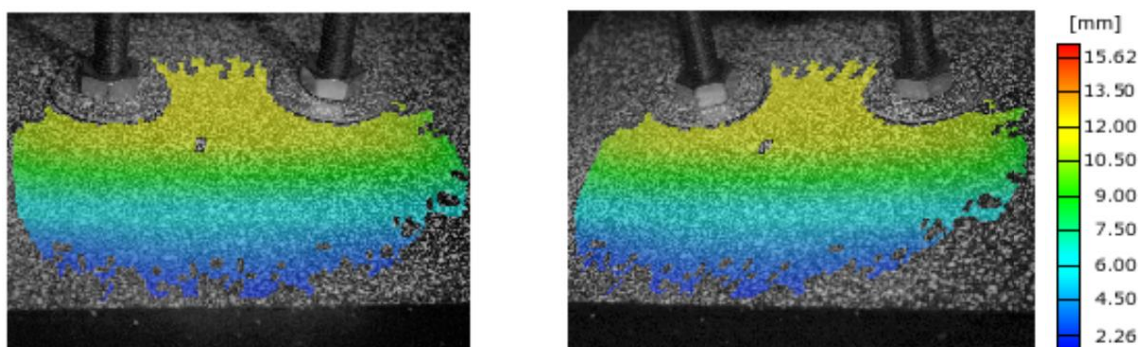


Slika 65. Polje pomaka za uzorak B-S2

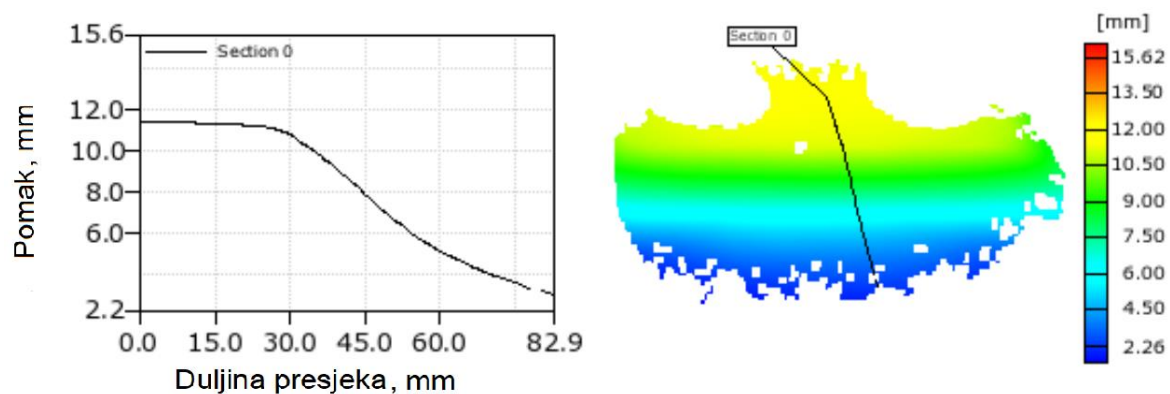


Slika 66. Dijagram pomak-duljina presjeka za uzorak B-S2

Na slici 67 prikazano je polje pomaka na uzorku C-S2 snimljeno lijevom i desnom kamerom u 228. sekundi testiranja, a na slici 68 iznos pomaka po presjeku uzorka.

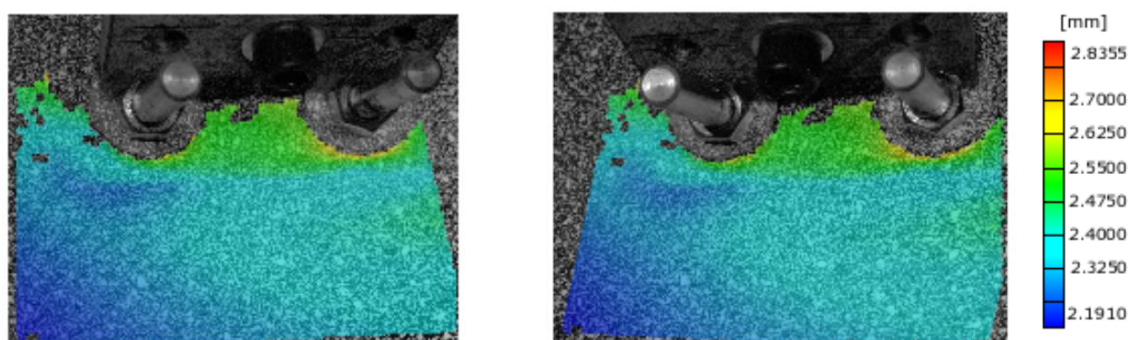


Slika 67. Polje pomaka za uzorak C-S2

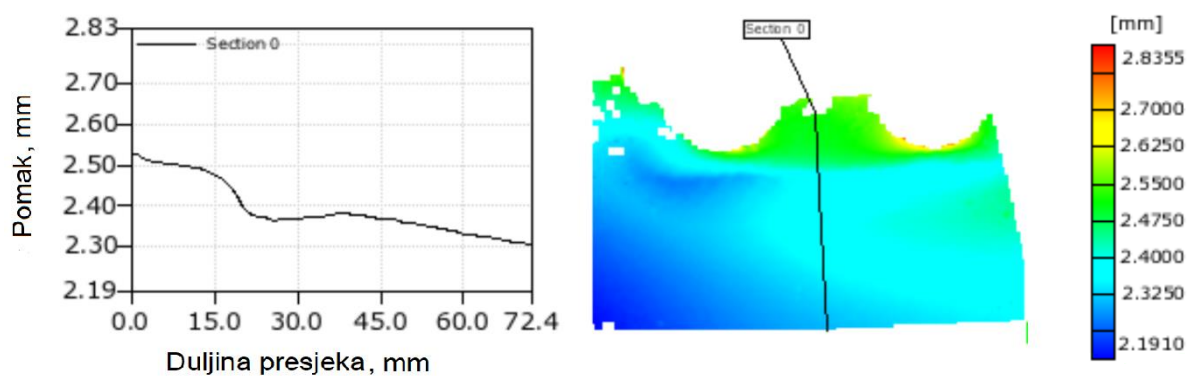


Slika 68. Dijagram pomak-duljina presjeka za uzorak C-S2

Na slici 69 prikazano je polje pomaka uzorka D-S2 snimljeno lijevom i desnom kamerom u 304. sekundi testiranja. Slika 70 prikazuje iznos pomaka po presjeku uzorka nakon 304. sekundi testiranja.



Slika 69. Polje pomaka za uzorak D-S2



Slika 70. Dijagram pomak-duljina presjeka za uzorak D-S2

7.1.2. Zaključci ispitivanja uzoraka na savijanje

Rezultati ispitivanja uzoraka opterećenih na savijanje pokazuju da uzorak A-S2 ima najveću čvrstoću. Uzorci s aluminijskim umetcima (uzorci A-S1, A-S2, B-S1, B-S2) pokazuju veću čvrstoću u odnosu na uzorke s umetcima od šperploče (uzorci C-S2 i D-S2). S obzirom na podloške, umetak A-S1 je izdržao manji moment od A-S2, dok je uzorak B-S1 izdržao veći moment od B-S2. Razlika u vrijednosti maksimalnog momenta uzorka A-S1 i uzorka A-S2 iznosi 171,4 Nm, dok ta razlika kod uzoraka B-S1 i B-S2 iznosi 13,2 Nm. Razlika u utjecaju podloške na čvrstoću uzoraka vidljiva je na slikama 71 a) i b). Podloška 1 se urezala u koru uzoraka kao što je to vidljivo na slici 71 a).



a)



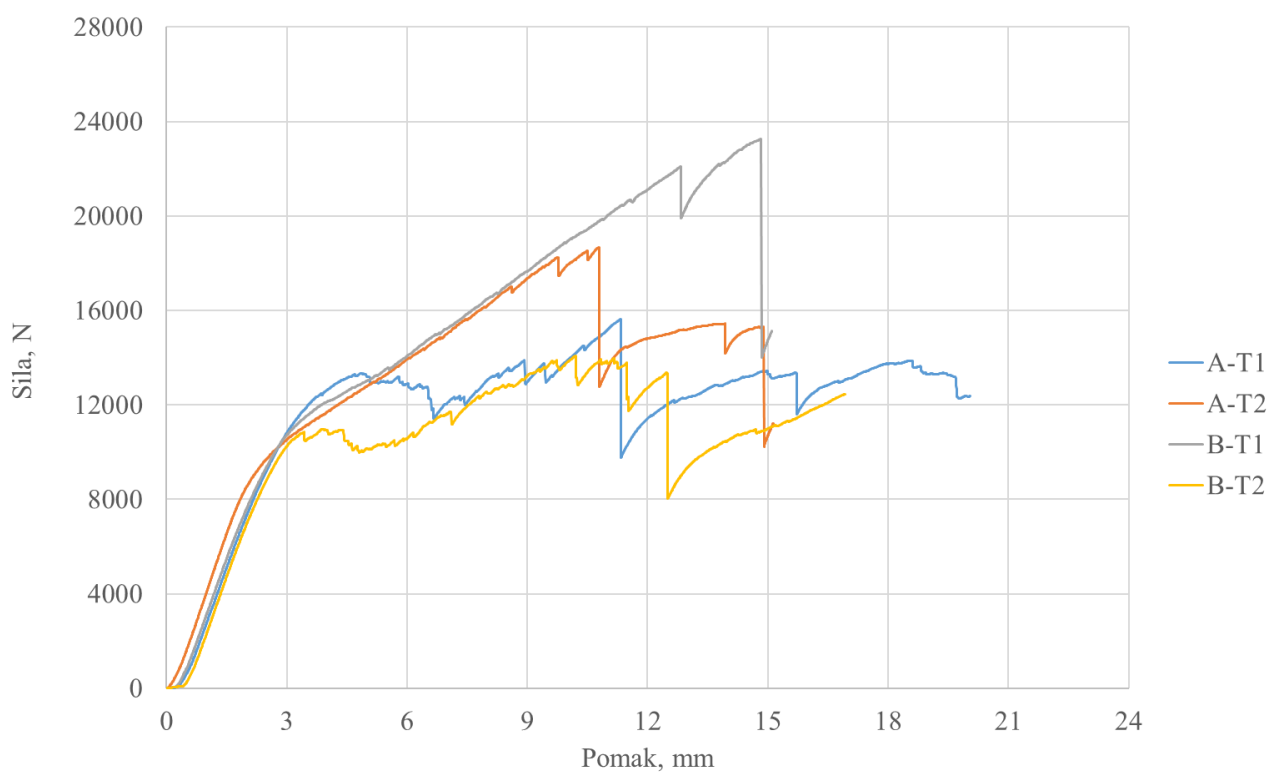
b)

Slika 71. Oštećenje na uzorcima nakon opterećenja na savijanje: a) uzorak A-S1 i b) uzorak C-S2

Uspoređujući uzorke C-S i D-S može se zaključiti da su dodatni slojevi oko umetka u uzorku D-S pridonijeli čvrstoći uzorka. Prema rezultatima ispitivanja, nakon postizanja kritične sile dolazi do naglog pada sile, što kod uzoraka s umetcima od šperploče nije prisutno. Iznos pomaka po duljini presjeka kod uzoraka s aluminijskim umetcima pokazuju veliku razliku u iznosu pomaka u području površine umetka i u području jezgre oko umetka. Na području ruba umetka postoji nagli pad iznosa pomaka. Kod uzoraka s umetcima od šperploče pad iznosa pomaka po duljini presjeka je puno blaži u odnosu na pad pomaka po presjeku kod uzoraka s aluminijskim umetcima. Najveći iznos deformacija po von Misesu za umetak A-S1 je na području spoja umetka i jezgre uzorka.

7.2. Rezultati ispitivanja uzoraka opterećenih na tlak

Brzina opterećivanja na statičkoj kidalici kod ispitivanja uzoraka iznosila je 3,5 mm/min. Na slici 72 prikazan je dijagram ovisnosti pomaka o tlačnoj sili za uzorke A-T1, A-T2, B-T1 i B-T2. U tablici 9 dani su iznosi kritične tlačne sile za sva četiri uzorka.



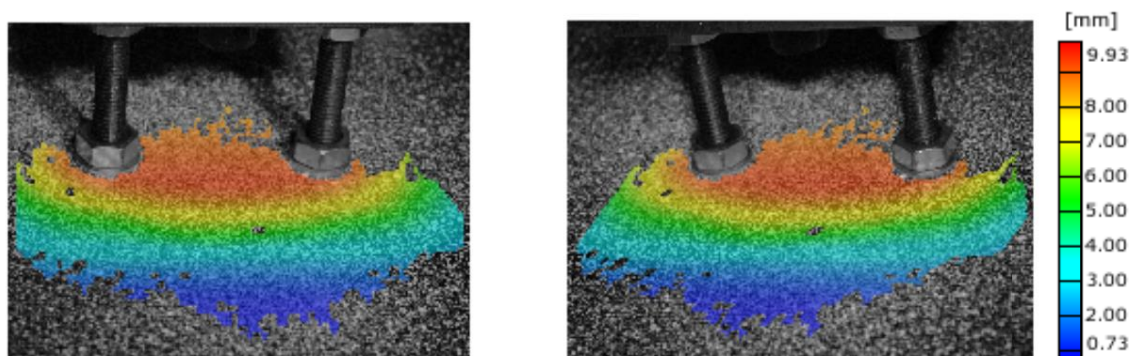
Slika 72. Dijagram sila-pomak za uzorke A-T1, A-T2, B-T1, B-T2 pri tlačnom opterećenju

Tablica 9. Iznos maksimalne sile za tlačno opterećene uzorke

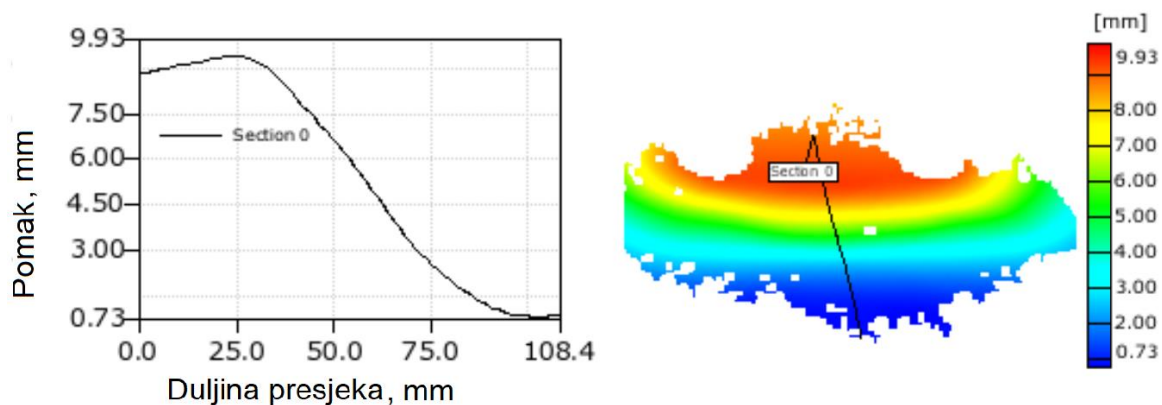
Uzorak	F_{\max} N
A-T1	15638
A-T2	18673
B-T1	23250
B-T2	14077

7.2.1. Pomaci i deformacije uzoraka pri tlačnom opterećenju

Kao i kod uzoraka opterećenih na savijanje, brzina snimanja je postavljena na jedan snimak svake 2. sekunde. Veličina faseta je podešena na 25 x 20 piksela, s pet preklapajućih piksela. Radi velikog broja uzoraka prikazat će se rezultati samo za odabrane uzorke. Na slici 73 prikazano je polje pomaka za uzorak A-T1 snimljeno lijevom i desnom kamerom u 172. sekundi testiranja. Promjena iznosa pomaka po presjeku uzorka u istom trenutku ispitivanja vidljiva je na slici 74.

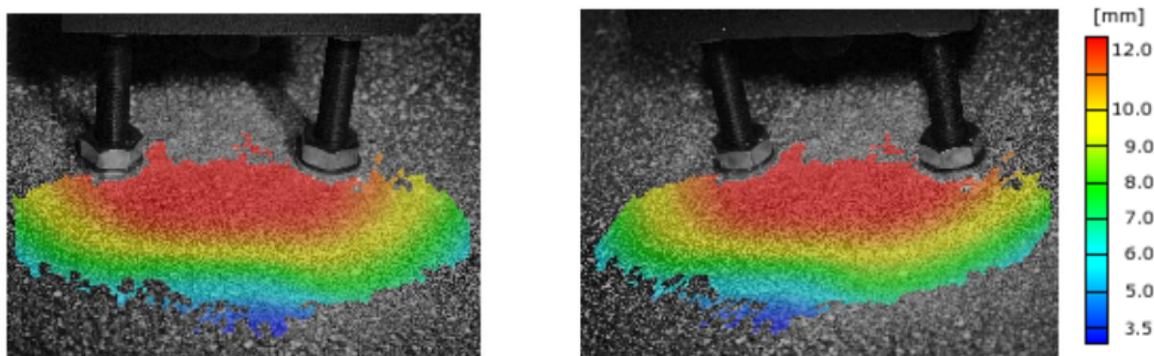


Slika 73. Polje pomaka za uzorak A-T1

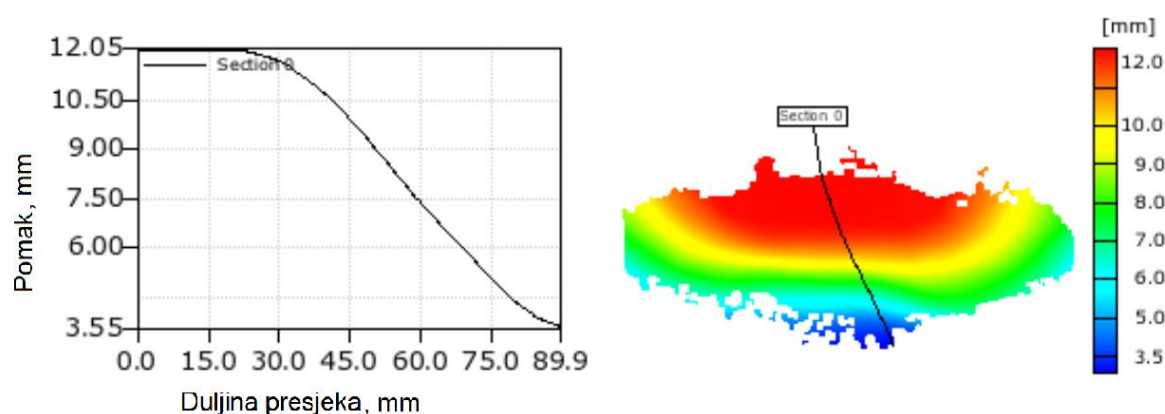


Slika 74. Dijagram pomak-duljina presjeka za uzorak A-T1

Na slici 75 prikazano je polje pomaka za uzorak B-T2 snimljeno lijevom i desnom kamerom u 228. sekundi testiranja, a na slici 76 prikazana je promjena pomaka po presjeku uzorka u istom trenutku ispitivanja.



Slika 75. Polje pomaka za uzorak B-T2



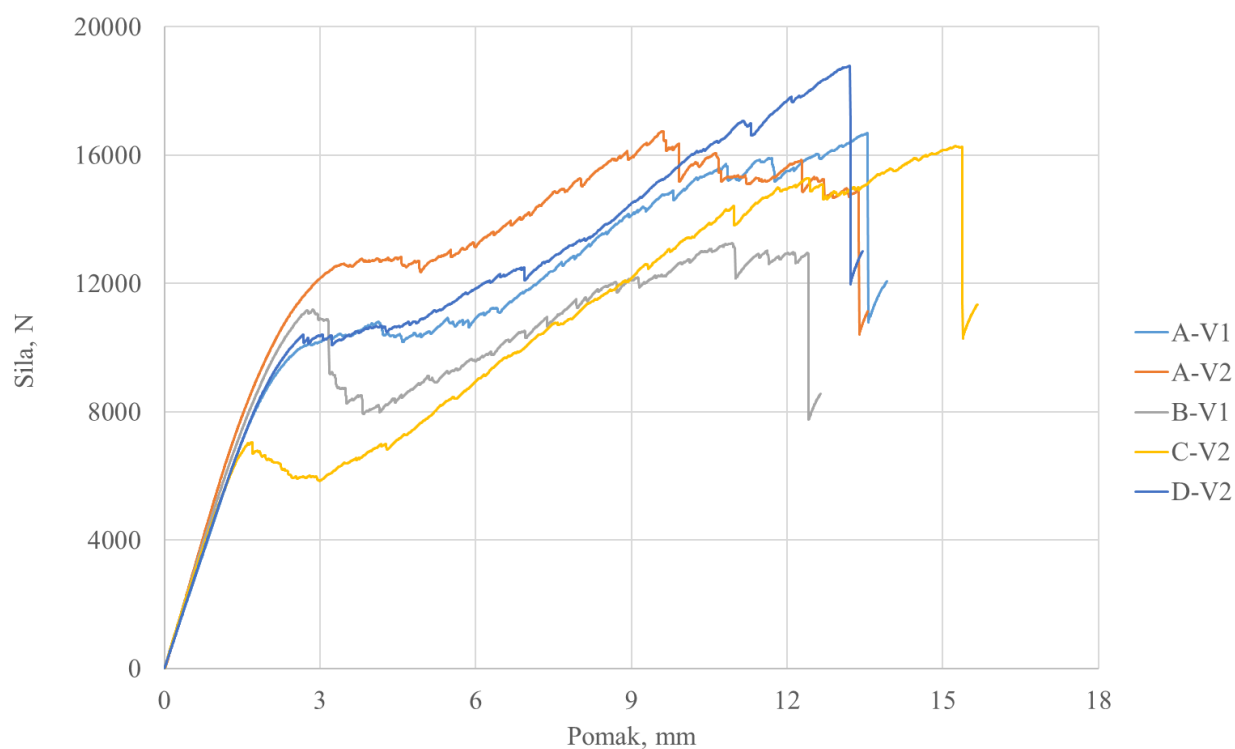
Slika 76. Dijagram pomak-duljina presjeka za uzorak B-T2

7.2.2. Zaključci testiranja tlačno opterećenih uzoraka

Ispitivanje uzoraka pri tlačnom opterećenju pokazuje da je uzorak B-T1 izdržao maksimalnu silu od 23,25 kN. Uzorak B-T2 je izdržao najmanju kritičnu silu. Plastične deformacije se javljaju pri iznosu sile od 10,8 kN. Kod svih uzoraka prisutan je nagli pad sile nakon dostizanja kritične sile. Analizom područja pomaka nije vidljiva znatna razlika u padu iznosa pomaka po duljini presjeka između uzoraka. Pad iznosa pomaka po duljini presjeka je postupan.

7.3. Rezultati ispitivanja uzoraka opterećenih na vlak

Na slici 77 prikazan je dijagram ovisnosti pomaka o vlačnoj sili za uzorke A-V1, A-V2, B-V1, B-V2, C-V2 i D-V2. U tablici 10 dani su iznosi kritičnih vlačnih sila za sva četiri uzorka. Brzina opterećivanja kod svih uzoraka iznosila je 3,5 mm/min.



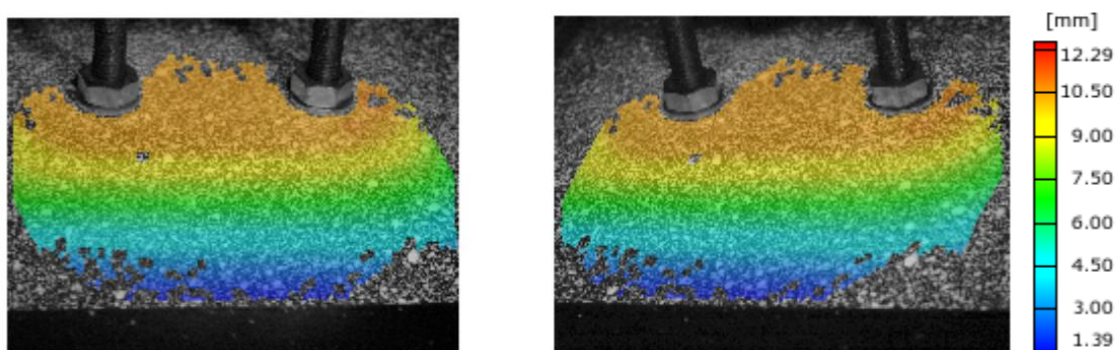
Slika 77. Dijagram sila-pomak za uzorke A-V1, A-V2, B-V1, B-V2, C-V2 i D-V2 pri vlačnom opterećenju

Tablica 10. Iznos maksimalne sile kod vlačnog opterećenja uzoraka

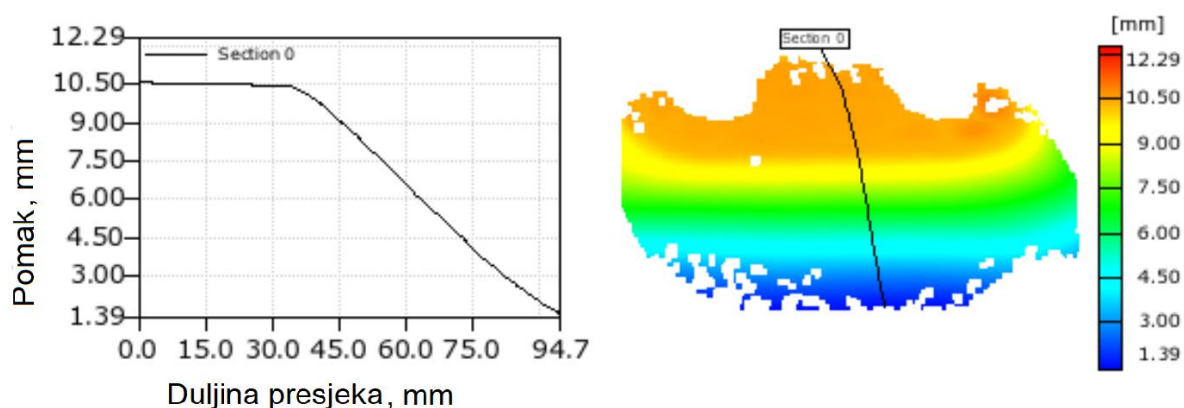
Uzorak	F_{\max} N
A-V1	16687
A-V2	16753
B-V1	13266
B-V2	16057
C-V2	16291
D-V2	18788

7.3.1. Pomaci i deformacije uzoraka pri vlačnom opterećenju

Kao i kod uzoraka opterećenih na savijanje i tlak brzina snimanja je iznosila jedan snimak svake 2. sekunde. Veličina fasete podešena je na 25 x 20 piksela, s pet preklapajućih piksela. Na slici 78 prikazano je polje pomaka uzorka B-V1 snimljeno lijevom i desnom kamerom u 200. sekundi testiranja. Promjena pomaka po presjeku uzorka u istom trenutku ispitivanja dana je na slici 79.

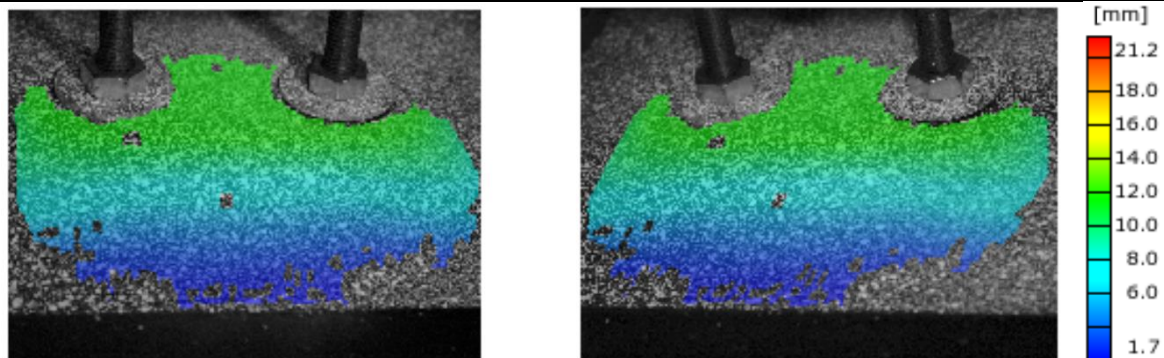


Slika 78. Polje pomaka za uzorak B-V1

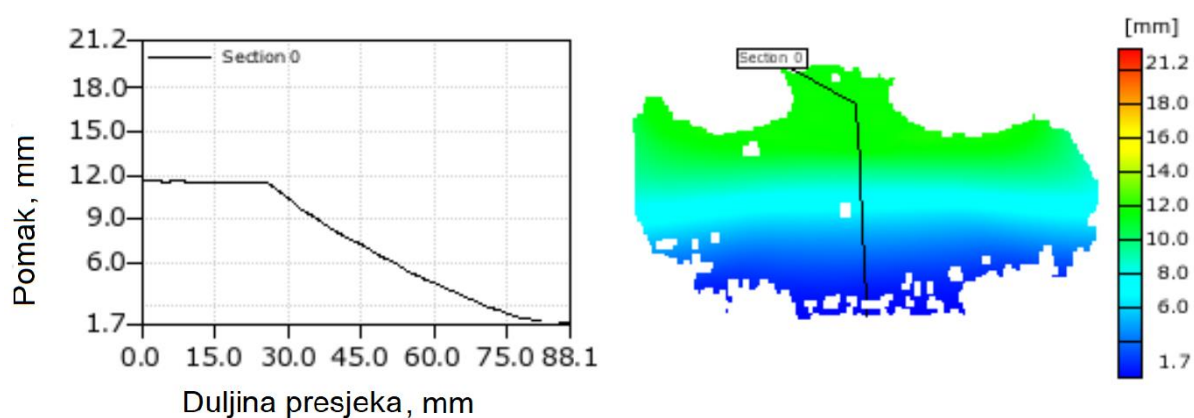


Slika 79. Dijagram pomak-duljina presjeka za uzorak B-V1

Za uzorak B-V2 polje pomaka u 220. sekundi ispitivanja prikazano je na slici 78, dok je promjena pomaka po duljini presjeka u istom trenutku ispitivanja dana na slici 79.

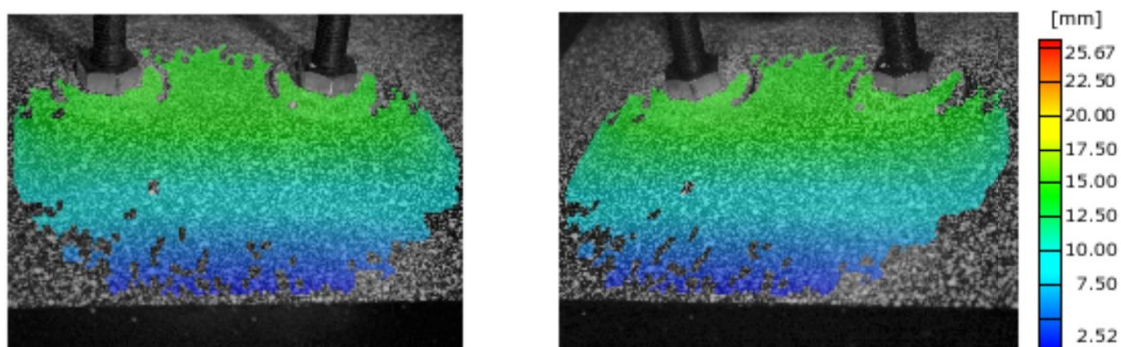


Slika 80. Polje pomaka za uzorak B-V2

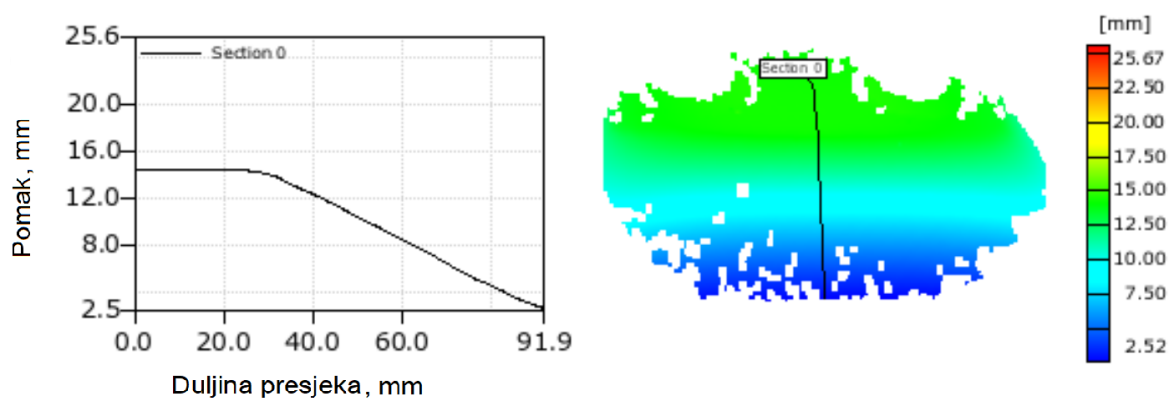


Slika 81. Dijagram pomak-duljina presjeka za uzorak B-V2

Za uzorak C-V2 prikazano je polje pomaka (Slika 82) te promjena pomaka po duljini presjeka snimljeno u 272. sekundi ispitivanja (Slika 83).

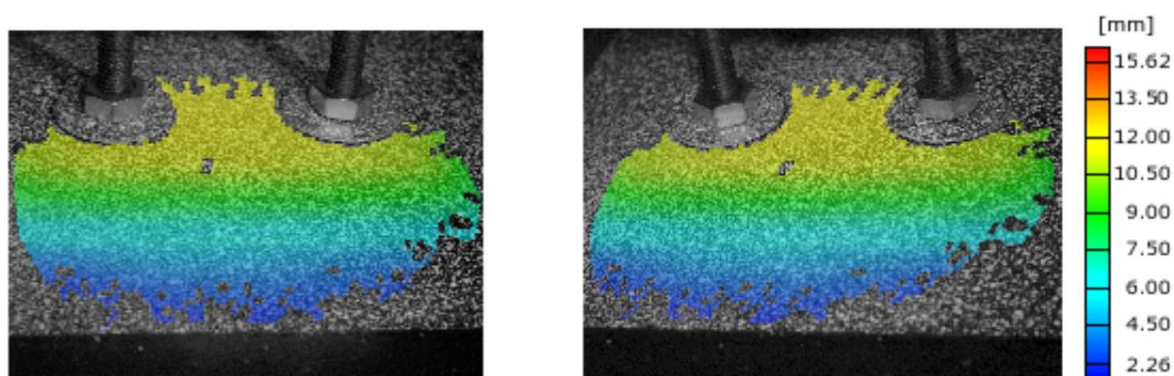


Slika 82. Polje pomaka za uzorak C-V2

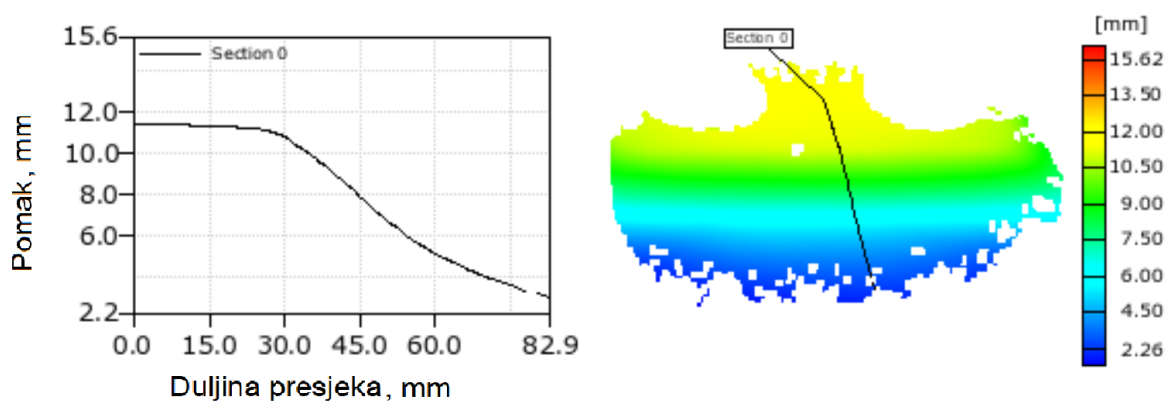


Slika 83. Dijagram pomak-duljina presjeka za uzorak C-V2

Za uzorak D-V2 polje pomaka te promjena pomaka po duljini presjeka u 228. sekundi ispitivanja prikazani su na slikama 84 i 85.



Slika 84. Polje pomaka za uzorak D-V2



Slika 85. Dijagram pomak-duljina presjeka za uzorak D-V2

7.3.2. Zaključci testiranja vlačno opterećenih uzoraka

Rezultati ispitivanja vlačno opterećenih uzoraka pokazuju da uzorak D-V2 ima najveću čvrstoću. Uzorak B-V2 je izdržao najmanju maksimalnu vlačnu silu. Uspoređujući uzorke C-V2 i D-V2 može se zaključiti da su dodatni slojevi oko umetka u uzorku D-S pridonijeli čvrstoći uzorka kao što je bio slučaj i kod ispitivanja uzoraka savijanjem. Kod uzorka C-V2 plastične deformacije se javljaju pri sili od 7 kN, što je najmanja sila pri kojoj se javljaju plastične deformacije u usporedbi s drugim uzorcima. Plastične deformacije se kod ostalih uzoraka javlja nakon što je dostignuta sila od približno 8 kN.

Za razliku od slučaja kada su uzorci opterećeni na savijanje, postupni pad sile nakon postizanja kritične je prisutan i kod uzoraka s aluminijskim umetcima i kod uzoraka s umetcima od šperploče. Postupni pad iznosa pomaka po duljini presjeka vidljiv je kod svih uzoraka.

8. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bilo je eksperimentalno ispitivanje veze između umetka i reprezentativnog uzorka monocoque šasije bolida Formule Student s ciljem određivanja opterećenja koja dovode do narušavanja integriteta kompozitne sendvič konstrukcije. Statička ispitivanja uzoraka su provedena pri savijanju, vlačnom i tlačnom opterećenju.

Ispitivanje uzoraka pri savijanju je pokazalo da je čvrstoća spoja između umetka i kompozitne sendvič strukture veća kod uzoraka s aluminijskim umetkom. Najveći moment u iznosu od 614,9 Nm izdržao je uzorak A-S2 s aluminijskim umetkom i podloškama većeg promjera. Uzorci s umetkom od šperploče su izdržali manji moment u usporedbi s uzorcima od aluminija. Maksimalni moment kod uzorka D-S2 s umetkom od šperploče te dodatnim slojevima preprega iznosio je 397,4 Nm, dok je kod uzorka C-S2 s umetkom od šperploče bez dodatnih slojeva preprega oko umetka moment bio manji za 11,3% i iznosio je 352,6 Nm. Iz rezultata ispitivanja uzoraka pri tlačnom opterećenju je vidljivo da je uzorak B-T1 s aluminijskim umetkom i podloškom manjih dimenzija izdržao najveću silu koja je iznosila 23,3 kN. Kod sva četiri uzorka s aluminijskim umetkom plastične deformacije se pojavljuju nakon što tlačna sila postigne vrijednost od približno 8 kN. Rezultati ispitivanja uzoraka pri vlačnom opterećenju pokazuju da je uzorak D-V2 s umetkom od šperploče izdržao najveću vlačnu silu u iznosu od 18,8 kN, dok je najmanja sila izmjerena kod uzorka B-V1 s aluminijskim umetkom i podloškom manjeg promjera. Kod ostalih uzoraka maksimalna vlačna sila je vrlo ujednačena i iznosi približno 16 kN. Kod svih testiranih uzoraka na vlačno opterećenje, osim uzorka C-V2, plastične deformacije se, kao i kod tlačnog opterećenja, javljaju nakon što se postigne sila od približno 8 kN.

Analiza polja pomaka je pokazala da su pomaci kod sva tri opterećenja najveći u području spoja umetka i jezgre te se smanjuju prema rubu uzorka. To smanjenje je kod uzoraka s umetkom od šperploče pri savijanju postupno, dok je kod uzoraka s aluminijskim umetkom nagli pad vrijednosti pomaka u području spoja umetka s jezgrom.

Po iznosu pomaci su najmanji kod savijanja i iznose do 4 mm, s izuzetkom uzorka C-S2 s umetkom od šperploče kod kojega maksimalni pomak iznosi 11,5 mm. Pomaci kod uzoraka s umetkom od šperploče mogu se pri savijanju višestruko smanjiti s dodatnim slojevima preprega oko umetka, što je vidljivo kod uzorka D-S2 s maksimalnim pomakom iznosa približno 2,5 mm. Kod vlačnog opterećenja pomaci su u prosjeku za 13% manji kod uzoraka s umetkom od aluminija u usporedbi s uzorcima s umetkom od šperploče. Iz rezultata je također vidljivo, da

za razliku od savijanja, kod vlačnog opterećenja dodatni sloj preprega ne utječe znatno na iznos pomaka.

Rezultati za deformacije potvrđuju već rečeno kod pomaka, odnosno deformacije su, kao i pomaci, najveće na mjestu spoja umetka s jezgrom.

Kako veliki broj faktora utječe na samu kvalitetu izrade uzoraka monocoque šasije, a time i na čvrstoću prihvata, potrebno je provesti dodatna ispitivanja s većim brojem uzoraka. Time bi se dobio bolji uvid u ponašanje kompozitne strukture pri savijanju, tlačnom i vlačnom opterećenju.

9. LITERATURA

- [1] <https://www.etechracing.es/en/formula-student2/> (pristupljeno 25.01.2019.)
- [2] FSG pravilnik, 2019.
- [3] Matuško, M.: Diplomski rad – Uporaba kompozitnih materijala za izradbu nosive konstrukcije vozila Formule Student, FSB, Zagreb, 2016.
- [4] Costub, M., Phipps, D.: *Racing and sports car chassis design*, B.T. Batsfort LTD London, 1966.
- [5] Projekt Formula Student Strix – FSB Racing Team, Rektorova nagrada, Zagreb, 2017.
- [6] <https://silodrome.com/first-light-story-behind-mclaren-mp41/>, (pristupljeno 25.01.2019.)
- [7] Vedvik, N. P.: Master thesis, Design, analysis and testing of joints on carbon fiber composite sandwich chassis, Trondheim, Norveška, 2014.
- [8] Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, Intergrafika TTŽ d.o.o., Zagreb, 2013.
- [9] HexWeb Honeycomb sandwich design technology, Hexcel composites, Duxford, 2000.
- [10] Savage, G.: Formula 1 Composites Engineering, Engineering Failure Analysis, Vol. 17, No.1, 2010.
- [11] <http://www.aero-consultants.ch/en/Prepregs/Advanced-Prepreg-Materials.htm> (pristupljeno 25.01.2019.)
- [12] Adamović, P.: Eksperimentalno ispitivanje umetka nosive konstrukcije bolida Formule Student uslijed različitih opterećenja, Završni rad, Zagreb, 2018.
- [13] https://www.fibreglast.com/product/about-prepregs/Learning_Centern (pristupljeno 25.01.2019.)
- [14] <http://blog.fibreglast.com/fiberglass/> (pristupljeno 25.01.2019.)
- [15] <https://larski.nl/our-process/> (pristupljeno 25.01.2019.)
- [16] Flemming, M., Ziegmann, G., Roth, S.: *Faserverbundbauweisen – Halbzeuge und Bauweisen*, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1996.
- [17] ECSS Secretariat, Requirements & Standards Division: *Space engineering Insert Design Handbook*: Noordwijk, Norveška, 2011.
- [18] Klein, B.: *Leichtbau- Konstruktion, Berechnungsgrundlagen und Gestaltung*, 8. Auflage, Vieweg+Teubner, Njemačka, 2009.
- [19] Aramis korisnički priručnik, Njemačka, 2004.

- [20] Surjak, M.: Validacija numeričkih modela mehaničkoga ponašanja životinjskih i ljudskih kostiju, Doktorski rad, Zagreb, 2015.
- [21] Van Kerkhoven, J.D.G.: Design of a Formula Student race car chassis, Master Thesis, Eindhoven, Nizozemska, 2008.
- [22] Andersson Eurenus, C., Danielsson, N., Khokar, A., Krane, E., Olofsson, M., Wass, J.: Analysis of Composite Chassis, Bachelor Thesis, Göteborg, Švedska, 2013.
- [23] Hagan, M., Rappolt, J., Waldrop, J.: Formula SAE Hybrid Carbon Fiber Monocoque/Steel Tube Frame Chassis, California, SAD, 2012.
- [24] Jurać, M.: Dimenzioniranje sendvič struktura te njihova primjena za izradu kompozitne šasije bolida Formule Student, Diplomski rad, Zagreb, 2019.
- [25] https://downloads.chemtrend.com/downloads/product_data_sheets (pristupljeno 18.02.2019.)

PRILOZI

I. CD-R disc